

Міністерство освіти і науки України
Державний заклад
«Луганський національний університет імені Тараса Шевченка»

Навчально-науковий інститут математики та інформаційних технологій

Кафедра інформаційних технологій та систем

Голоцван Іван Миколайович

**АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ ТЕХНОЛОГІЙ ПОБУДОВИ RFID МІТОК ТА
ВИКОРИСТАННЯ ЇХ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА**

кваліфікаційна робота

здобувача вищої освіти другого (магістерського) рівня

освітньої програми «Комп'ютерні мережі»

за спеціальністю 123 Комп'ютерна інженерія

Особистий підпис _____ Іван ГОЛОЦВАН

Науковий керівник _____ Геннадій МОГИЛЬНИЙ,
кандидат технічних наук, доцент
кафедри інформаційних технологій
та систем

Завідувач кафедри _____ Микола СЕМЕНОВ,
кандидат педагогічних наук, доцент
кафедри інформаційних технологій
та систем

Полтава – 2025

АНОТАЦІЯ

Голоцван І. М.

Тема: Аналіз існуючих технологій побудови RFID міток та використання їх у технологіях точного землеробства.

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія».

Установа: ЛНУ імені Тараса Шевченка, 2025 р.

Магістерська робота містить: 85 с., 29 рис., 2 табл., 18 джерел.

Об'єкт дослідження – використання RFID міток у технологіях точного землеробства.

Предмет дослідження – методи визначення місцеположення RFID-міток.

Мета дослідження - проведення комплексного аналізу існуючих технологій RFID та розробка нового алгоритму для підвищення точності визначення координат RFID-міток з метою застосування в системах точного землеробства.

Результати роботи. В роботі ґрунтуючись на аналізі новітніх технологій виробництва мікросенсорних систем проводилась розробка напрямків використання RFID пристроїв у технологіях точного землеробства.

При цьому було проведено огляд RFID технологій та принципи побудови точного землеробства, проаналізовані мікросенсорні мережеві технології для моніторингу врожаю і мінімізації впливу хімічної обробки рослин.

Розглянуто склад системи радіо частотної ідентифікації та фізичні принципи роботи системи та базові технології виготовлення RFID-міток.

Висновок. В результаті роботи було розроблено рекурентний алгоритм визначення місцеположення RFID-міток, який, на відміну від наявних підходів, враховує дисперсію похибок вимірювання потужності сенсорами мережі. У цьому алгоритмі реалізовано послідовну обробку RSS-вимірювань, отриманих від сенсорної мережі, що дозволяє уникнути обчислювально складного обертання матриць великої розмірності.

Ключові слова. RFID-МІТКИ, ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ, ФІЛЬТР КАЛМАНА, RSS-ВИМІРЮВАННЯ.

ABSTRACT

Holotsvan Ivan

Theme: Analysis of existing technologies for building RFID tags and their use in precision agriculture technologies.

Speciality: 123 "Computer Engineering"

Institution: Luhansk Taras Shevchenko National University (LTSNU), 2025.

Master's work of: 85 pages, 29 Fig., 2 Table, 1 adj., 18 source.

A research object is use of RFID tags in precision agriculture technologies.

The article of research is methods for determining the location of RFID tags.

An aim of work is conducting a comprehensive analysis of existing RFID technologies and developing a new algorithm to increase the accuracy of determining the coordinates of RFID tags for use in precision farming systems.

Job performances. In the work, based on the analysis of the latest technologies for the production of microsensor systems, the development of directions for the use of RFID devices in precision agriculture technologies was carried out.

At the same time, a review of RFID technologies and principles of building precision agriculture was conducted, microsensor network technologies for monitoring the harvest and minimizing the impact of chemical treatment of plants were analyzed.

The composition of the radio frequency identification system and the physical principles of the system and basic technologies for manufacturing RFID tags were considered.

Conclusions. As a result of the work, a recurrent algorithm for determining the location of RFID tags was developed, which, unlike existing approaches, takes into account the variance of errors in power measurement by network sensors. This algorithm implements sequential processing of RSS measurements obtained from the sensor network, which allows avoiding the computationally complex rotation of high-dimensional matrices.

Keywords. RFID TAGS, LOCATION, KALMAN FILTERING, RSS MEASUREMENTS.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД RFID ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА.....	10
1.1. Історія RFID та принцип роботи	10
1.2. Класифікація систем RFID і області застосування.....	13
1.3. Принципи побудови точного землеробства	21
1.4. Мікросенсорні мережеві технології для моніторингу врожаю і мінімізації впливу хімічної обробки рослин	31
Висновки до розділу	34
РОЗДІЛ 2. РАДІОЧАСТОТНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ.....	35
2.1. Принцип роботи RFID-систем.....	35
2.2. Технологія виробництва RFID-мітки.....	37
2.3. Гнучкі батареї	42
Висновок до розділу	47
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ RFID-МІТОК НА ОСНОВІ RSS-ВИМІРЮВАНЬ	49
3.1. Методи визначення дальності.....	49
3.1.1. RSS (Received Signal Strength)	49
3.1.2. AoA (Angle of Arrival)	50
3.1.3. ToA (Time of Arrival)	52
3.1.4. TDoA (Time Difference of Arrival)	54
3.2. Методи розрахунку координат	55
3.2.1. МНК – метод найменших квадратів	56
3.2.2. Формули Байєса	58
3.2.3. Фільтр Калмана	60
3.3. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення RFID-міток на основі RSS-вимірювань	65
3.4. Розробка алгоритму визначення місцеположення RFID-міток.....	71

3.4.1. Розробка алгоритму	72
3.4.2. Аналіз ефективності розробленого алгоритму	74
3.4.3. Аналіз можливостей практичної реалізації розробленого алгоритму	78
Висновки до розділу	80
ВИСНОВКИ.....	82
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	84

ВСТУП

У сучасному світі пристрої радіочастотної ідентифікації (RFID) знайшли широке застосування. Ця технологія використовує радіочастотне електромагнітне випромінювання для запису, зчитування та обробки інформації за допомогою спеціальних пристроїв. Основними компонентами RFID-систем є зчитувач (рідер) і радіочастотна мітка (транспондер).

Рідер являє собою електронний пристрій для отримання даних про об'єкти. Він має великий радіус дії, високу потужність і здатність одночасно обробляти інформацію з кількох транспондерів.

RFID-системи, впроваджені для управління переміщенням продукції, дозволяють оптимізувати складські та транспортні процеси, мінімізувати людський фактор, зменшити часові втрати та уникнути втрат товару під час його транспортування. У роздрібній торгівлі RFID допомагає підтримувати оптимальні складські запаси, прискорює обробку покупок на касах і забезпечує захист від крадіжок.

Крім того, ця технологія є надзвичайно актуальною для сільського господарства, зокрема в точному землеробстві, де вона сприяє підвищенню ефективності та точності управління виробничими процесами.

Точне землеробство - це управління продуктивністю посівів з урахуванням варіабельності довкілля рослин. Умовно кажучи, це оптимальне управління для кожного квадратного метра поля. Метою такого управління є отримання максимального прибутку за умови оптимізації сільськогосподарського виробництва, економії господарських і природних ресурсів. При цьому відкриваються реальні можливості виробництва якісної продукції та збереження навколишнього середовища.

Такий підхід, як показує міжнародний досвід, забезпечує набагато більший економічний ефект і, найголовніше, дозволяє підвищити відтворення ґрунтової родючості і рівень екологічної чистоти сільськогосподарської продукції.

В даний час зростання цін на насіння, мінеральні добрива, засоби захисту рослин, техніку та інші засоби виробництва в сільському господарстві призводить до необхідності підвищувати ефективність їх використання.

Перед керівниками і спеціалістами сільського господарства стоїть завдання підвищення рівня менеджменту, як важливого фактору для досягнення результативного господарювання. Поставлену задачу вирішує новий напрямок під назвою точне землеробство, яке в даний час набуває все більшого поширення в багатьох країнах.

Точне землеробство – це комплексна високотехнологічна система сільськогосподарського менеджменту, що включає в себе технології глобального позиціонування (GPS), географічні інформаційні системи (GIS), технології оцінки врожайності (Yield Monitor Technologies), технологію змінного нормування (Variable Rate Technology) і технології дистанційного зондування землі (ДЗЗ).

Суть точного землеробства в тому, що обробка полів проводиться в залежності від реальних потреб вирощуваних в даному місці культур. Ці потреби визначаються за допомогою сучасних інформаційних технологій, включаючи космічну зйомку. При цьому кошти обробки диференціюються в межах різних ділянок поля, даючи максимальний ефект при мінімальному збитку навколишньому середовищу і зниженні загальної витрати застосовуваних речовин. Найбільш важливим питанням, рішенням останнім часом в європейських країнах, було знаходження оптимального рівня використання добрив і хімікатів в рослинництві, а також визначення доз їх внесення, що виключають негативний вплив на ґрунт, рослини і навколишнє середовище.

Одним з напрямків у впровадженні точного землеробства як основи збільшення продуктивності посівів та зменшення навантаження на ґрунти ядохімікатів, добрив є використання мікросенсорних мережевих технологій побудованих на використанні RFID.

Для створення автоматизованої системи моніторингу використовують бездротову сенсорну мережу з великим радіусом дії, яка, завдяки розвитку

технологій, здатна відстежувати рухомі об'єкти. Для визначення місцеположення RFID-міток застосовується метод, що ґрунтується на аналізі отриманої потужності сигналу від міток (RSS-вимірювання). Цей підхід вирізняється простотою практичної реалізації, але в чистому вигляді він не забезпечує достатньої точності у визначенні координат RFID-міток.

Об'єкт дослідження – використання RFID міток у технологіях точного землеробства.

Предмет дослідження – методи визначення місцеположення RFID-міток.

Мета дослідження - проведення комплексного аналізу існуючих технологій RFID та розробка нового алгоритму для підвищення точності визначення координат RFID-міток з метою застосування в системах точного землеробства.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- провести огляд RFID технологій та принципи побудови точного землеробства, проаналізувати мікросенсорні мережеві технології для моніторингу врожаю і мінімізації впливу хімічної обробки рослин;
- розглянути склад системи радіо частотної ідентифікації та фізичні принципи роботи системи та базові технології виготовлення RFID-міток;
- провести аналіз існуючих методів визначення місцеположення RFID-міток на основі вимірювань рівня сигналу RSS;
- розробити рекурентний алгоритм, який буде уточнювати координати міток по мірі надходження RSS-вимірювань від датчиків бездротової сенсорної мережі, заснований на математичному апараті фільтрації Калмана.

Методи дослідження. У роботі застосовувалися методи теорії ймовірностей, лінійної та нелінійної фільтрації в дискретному часі, статистичної теорії прийняття рішень і статистичного моделювання на ЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів. Розроблено рекурентний алгоритм визначення місцеположення RFID-міток, який, на відміну від наявних

підходів, враховує дисперсію похибок вимірювання потужності сенсорами мережі. У цьому алгоритмі реалізовано послідовну обробку RSS-вимірювань, отриманих від сенсорної мережі, що дозволяє уникнути обчислювально складного обертання матриць великої розмірності.

РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД RFID ТЕХНОЛОГІЙ ТА ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА

1.1. Історія RFID та принцип роботи

RFID (англ. Radio Frequency Identification) або "радіочастотна ідентифікація" — це технологія, що належить до групи AIDC (англ. Automatic Identification and Data Capture), тобто "автоматичної ідентифікації та збору даних". Вона використовується для автоматичного розпізнавання об'єктів і збору даних про них, що потім можуть бути інтегровані в комп'ютерні системи без участі людини.

Основний принцип роботи такий: коли об'єкт із RFID-міткою потрапляє в зону дії зчитувача, той надсилає сигнал, щоб отримати інформацію з мітки. У мітці може міститися різна інформація про об'єкт, наприклад, серійний номер, часові позначки, конфігураційні інструкції тощо. Після отримання інформації зчитувач передає її до контролера через мережевий інтерфейс. Контролер може використовувати ці дані для різних цілей, таких як ведення інвентаризації або управління процесами, наприклад, у виробничих лініях.

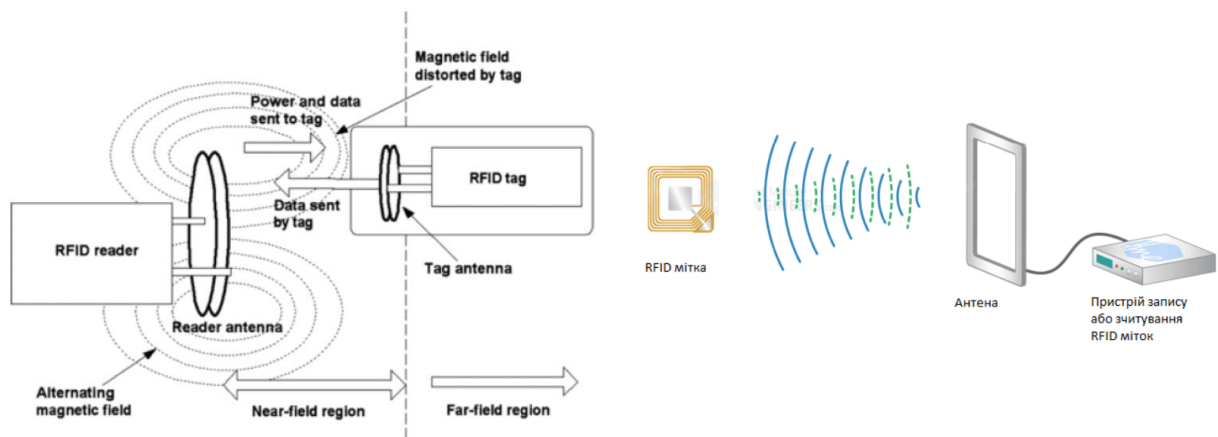


Рис. 1.1. Принцип роботи RFID

Однією з головних особливостей NFC у порівнянні з іншими типами RFID є значно менший радіус зчитування. Якщо інші види RFID дозволяють одночасно зчитувати дані з великої кількості міток, наприклад, з цілого піддона, то NFC-мітки зчитуються виключно по одній.

Перші промислові користувачі RFID-технології з'явилися в середині 1950-х років, коли науковці активно обговорювали її перспективи. Тодішні

обмеження, пов'язані з високою вартістю та великими розмірами міток, стримували широке впровадження.

У 1970-х роках розпочалася розробка різних варіацій RFID-систем, які знайшли застосування в логістиці, бібліотеках, ідентифікації тварин, транспорті та інших галузях. У 1980–1990-х роках відбувся значний прогрес у створенні пасивних міток, що дозволило розширити сфери їх використання.

На початку XXI століття RFID активно впроваджується у торгівлі та логістиці великими компаніями, такими як Walmart, Target та Metro. У цей період технологія також почала використовуватися державними структурами, зокрема Міністерством оборони США, яке запровадило її серед своїх постачальників.

Зростання інтересу до RFID сприяло створенню організації EPCGlobal, яка розробляє стандарти для цієї технології. Відтоді RFID почала поступово охоплювати ринок, ставши передовим рішенням для автоматизації виробничих і логістичних процесів, завдяки її ефективності в зборі та обробці інформації.

Сьогодні RFID-технології активно використовуються для управління переміщенням матеріальних ресурсів на виробничо-складських комплексах. Безконтактні радіочастотні рішення поступово проникають у нові сфери економіки: від логістики та роздрібної торгівлі до медицини, безпеки, громадського транспорту тощо.

Однак впровадження RFID у повсякденне життя супроводжується низкою викликів. Зокрема, споживачі без спеціального обладнання не завжди можуть виявити RFID-мітки, прикріплені до товарів на етапах виробництва чи пакування, і видалити їх. Концепція технології передбачає, що RFID-мітка з унікальною інформацією закріплюється на об'єкті для його ідентифікації й обліку. Ця мітка передає дані через безконтактний зв'язок у базу даних, дозволяючи в режимі реального часу відстежувати стан об'єкта.

Перше практичне застосування RFID-міток було в аеропортах для маркування багажу, але цей досвід виявився проблемним: понад половина міток під час тривалих рейсів розмагнічувалася. Серед інших обмежень технології —

складнощі зчитування через металічну упаковку чи рідини, які можуть впливати на якість передачі даних.

Розвиток ринку RFID-технологій гальмують три основні фактори: висока вартість міток, складність зчитування інформації з деяких об'єктів і недостатня розвиненість IT-інфраструктури. Як зазначають експерти, більшість компаній наразі не мають нагальної потреби у переході зі штрих-кодів на RFID. Хоча ця технологія надає певні зручності та переваги, не всі підприємства готові інвестувати в її впровадження.

Перехід на RFID обирають ті, для кого швидкість обробки інформації є критично важливою. При цьому RFID-мітки мають суттєву перевагу над штрих-кодами — їх практично неможливо підробити.

Технологія радіочастотної ідентифікації (RFID) є одним із найактуальніших трендів у сфері маркування товарів. У торгівлі RFID застосовується для аналізу переміщення продукції, відкриваючи нові перспективи. Серед ключових переваг — повний контроль руху товарів, підвищення якості обслуговування, зниження помилок і захист від крадіжок. Час покаже, які ще можливості стане доступним завдяки цій технології.

Західні ритейлери вже накопичили значний досвід використання RFID, і перші амбітні проекти впроваджуються в Україні. Для IT-фахівців компаній важливим завданням є інтеграція RFID із системами управління поставаннями (SCM), відносинами з клієнтами (CRM) і ресурсами підприємства (ERP), забезпечуючи гармонійну роботу всієї системи. Також необхідно навчити менеджерів із продажу розуміти механізми роботи RFID та її переваги.

Головною складністю впровадження технології є необхідність поєднати існуючі закриті системи з новими відкритими технологіями, які передбачають інтеграцію обладнання та IT-інфраструктури. Водночас ритейлерам важливо не лише керувати товарообігом, але й оптимізувати асортимент торгового обладнання для підвищення прибутковості.

Менеджерам із закупівель потрібен доступ до актуальних даних, щоб уникати втрат. Наявність дефіциту товарів на складі є неприйнятною ситуацією,

яка змушує компанії шукати інших постачальників. RFID дозволяє уникати таких помилок, забезпечуючи повну прозорість товарообігу у роздрібній мережі.

Ідея автоматизації в роздрібній торгівлі вже давно не є новою. Штрихове кодування стало найбільш популярною технологією з моменту свого впровадження у сферу торгівлі. Його використання у різних галузях сприяло підвищенню продуктивності та прибутковості підприємств завдяки зниженню кількості помилок і скороченню часу на завдання, пов'язані з товарообігом. Сьогодні штрих-коди застосовуються повсюдно. Їх розвиток дозволяє ефективно відстежувати виробничі процеси, канали розподілу, постачання і продажі. Популярність штрих-кодів пояснюється їх широким застосуванням і великою кількістю користувачів.

У порівнянні зі штрих-кодами, технологія RFID має значно більше можливостей: вона підтримує кодування великих обсягів даних, дозволяє змінювати та перезаписувати інформацію, ідентифікує об'єкти без прямого контакту або візуального доступу, навіть у русі, і забезпечує захист від підробок. Проте впровадження RFID вимагає значних фінансових інвестицій. Для повної інтеграції потрібні RFID-мітки, спеціальні зчитувачі, принтери та ERP-система. Також необхідно врахувати розширення функціональних можливостей системи, що дозволить працювати з більшими обсягами даних.

Основною сферою застосування RFID є логістика та складські комплекси. Поєднання штрих-кодів і RFID-технологій може значно вплинути на ефективність виробників, дистриб'юторів і ритейлерів. Коли RFID буде повністю інтегрована в існуючі системи автоматизації та здобуде довіру користувачів, вона стане надійним доповненням до традиційних рішень, забезпечуючи ефективність там, де штрих-кодування виявляється недостатньо зручним.

1.2. Класифікація систем RFID і області застосування

Існує декілька критеріїв, за якими можна класифікувати RFID-мітки та системи (див. рис. 1.2):

- Діапазон частот. Визначається частотою електромагнітного випромінювання, яке використовується для зчитування та запису

даних. Від частоти залежить дальність зчитування, швидкість передачі даних та інші характеристики системи.

- Тип джерела живлення. RFID-мітки можуть бути пасивними (живляться від зчитувача), активними (мають власне джерело живлення) або напівпасивними (комбінують обидва типи живлення).
- Тип пам'яті. Визначається типом використовуваної пам'яті для зберігання даних (EEPROM, FRAM тощо).
- Виконання. Мається на увазі фізична реалізація мітки (наприклад, у вигляді картки, брелка, наклейки).

Варто зазначити, що діапазон робочих частот має значний вплив на характеристики RFID-системи. Як правило, чим вища частота, тим більша дальність зчитування інформації з міток [3].



Рис. 1.2. Класифікація RFID систем

Сучасні RFID-системи оперують у чотирьох основних частотних діапазонах: 125-150 кГц, 13,56 МГц, 862-950 МГц та 2,4-5 ГГц. Вибір цих діапазонів обумовлений, перш за все, регуляторними вимогами різних країн, які дозволяють використовувати ці частоти для комерційних розробок. Наприклад, діапазон 2,45 ГГц широко використовується для бездротових технологій, таких як Bluetooth і Wi-Fi.

Для кожного діапазону існують свої стандарти, що визначають характеристики системи, такі як дальність зчитування, швидкість передачі даних та інші параметри. Детальніше характеристики різних діапазонів наведено в таблиці 1.1.

Низькочастотні RFID-мітки, як правило, мають складні багатовиткові антени і використовуються в пасивних системах. Вони відрізняються низькою вартістю і часто застосовуються для ідентифікації тварин, людей та інших об'єктів. Однак, через велику довжину хвилі, такі системи мають обмежену дальність зчитування і схильні до перешкод та колізій при одночасному зчитуванні декількох міток.

Таблиця 1.1

Діапазони частот

Діапазон частот	Характеристики системи	Приклади застосування
Низькі 100-500 кГц	Мала дальність зчитування, низька вартість міток.	Контроль доступу. Ідентифікація тварин. Системи інвентаризації.
Середні 10-15 МГц	Середня дальність зчитування	Контроль доступу. Смарт-карти.
Високі 850-950 МГц 2,4-5,0 ГГц	Велика дальність та швидкість зчитування, потрібне точне націлювання зчитувача, висока вартість міток	Спостереження за перевезенням вантажів залізницею. Системи стягнення плати за користування дорогою з водіїв автомобілів.

Системи, що працюють на частоті 13,56 МГц, є популярним вибором завдяки своїй доступності, екологічності, високому рівню стандартизації та широкому спектру рішень. Вони широко застосовуються в таких сферах, як безконтактні платежі, логістика та системи ідентифікації особистості.

Стандарт ISO 14443 (типи A і B), розроблений для цього діапазону частот, забезпечує високий рівень безпеки завдяки системі диверсифікації ключів. Це дозволяє створювати більш відкриті системи, які використовують стандартизовані алгоритми шифрування. На основі цього стандарту створено безліч різноманітних систем, наприклад, систему оплати проїзду в Парижі.

Однак, навіть системи, що відповідають стандарту ISO 14443, можуть мати вразливості. Наприклад, карти Mifare Classic, які вважалися більш безпечними за своїх попередників, все ж таки були зламані. Крім того, всі системи, що працюють на середніх частотах, стикаються з проблемами, пов'язаними з дальністю зчитування, впливом металу та вологи, а також з можливістю колізій при одночасному зчитуванні декількох міток.

RFID-мітки, що працюють на ультрависоких частотах (UHF), здатні передавати дані на значно більші відстані, ніж їхні низькочастотні аналоги. Крім того, вони часто оснащені технологіями, що дозволяють зчитувати інформацію з декількох міток одночасно, не створюючи перешкод. Спочатку такі мітки розроблялися для відстеження товарів на складах та виробництвах. Ідея полягала в тому, щоб кожен виробник самостійно записував унікальний код товару (EPC) на мітку.

Однак з часом виявилось, що одного лише коду товару недостатньо. Виникла потреба забезпечити додатковий рівень захисту від підробок, тобто зробити кожен мітку унікальною. Але як це зробити, якщо ми хочемо, щоб виробник міг вільно записувати будь-який код товару?

Це завдання виявилось досить складним. Перші чіпи для UHF-міток мали фіксований унікальний ідентифікатор, але не забезпечували захист даних. Іншими словами, будь-хто міг зчитати всю інформацію з такої мітки. Наступне покоління чіпів навчилися захищати свої дані паролем, але втратили індивідуальність – їх можна було легко скопіювати.

Таким чином, виробники RFID-чіпів довгий час намагалися знайти оптимальне рішення, яке б поєднувало в собі унікальність кожної мітки та можливість запису довільного коду товару.

У 2008 році компанія NXP представила революційне рішення в галузі RFID-технологій – чіпи SL3S1202 і SL3FCS1002. Ці чіпи не лише відповідали всім сучасним стандартам, але й запропонували новий підхід до забезпечення унікальності кожної мітки.

Ключовою особливістю цих чіпів стало розділення поля ідентифікатора мітки (TID) на дві частини. Перша частина містить інформацію про виробника та модель чіпа, а друга – унікальний номер самого чіпа. Завдяки цьому кожна мітка стала абсолютно неповторною, що значно підвищило рівень безпеки систем, які їх використовують.

Нові чіпи зберегли всі переваги технології EPC Gen 2.0: можливість захисту даних паролем, гнучку настройку прав доступу та високу швидкість зчитування. Крім того, вони стали доступнішими за ціною порівняно з мітками, що працюють на інших частотах.

Мітки, що працюють на ультрависоких частотах, використовують просту антену, яка складається з одного витка дроту. Така конструкція дозволяє зробити мітку мініатюрною та дешевою. Окремий вид UHF-міток, відомий як мітки ближнього поля, взаємодіє з об'єктами за допомогою магнітного поля. Це дозволяє зчитувати інформацію навіть в умовах високої вологості, наявності води чи металу. Завдяки цій особливості, такі мітки перспективні для використання в фармацевтичній промисловості, де багато препаратів містять вологу або металеві елементи в упаковці. Найбільш економічними є пасивні мітки, які лише здатні віддавати інформацію, але не приймати її. Їх дальність дії зазвичай обмежена кількома метрами.

RFID-мітки можна класифікувати за способом живлення: пасивні, активні та напівпасивні.

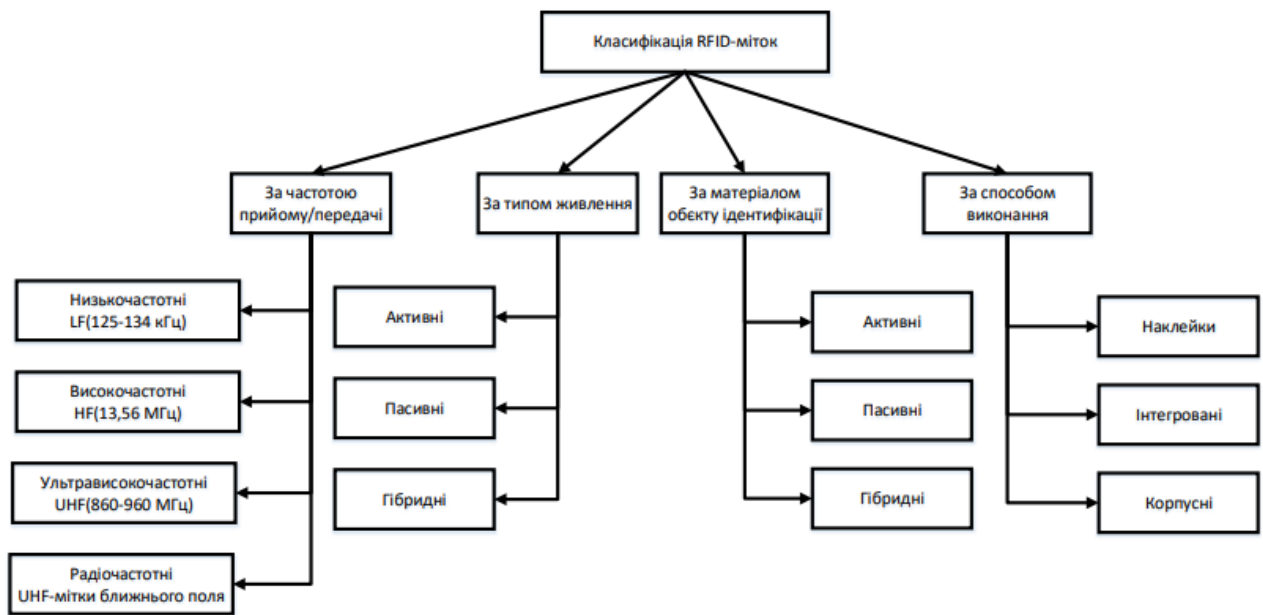


Рис. 1.3. Класифікація RFID-міток

Пасивні мітки не мають власного джерела живлення. Вони "заряджаються" від сигналу зчитувача, який індукує в антені електричний струм. Цей струм достатній для живлення невеликого чіпа, який зберігає інформацію.

Активні мітки мають власне джерело живлення, зазвичай це батарейка. Це дозволяє їм працювати незалежно від зовнішніх джерел енергії і передавати сигнал на більші відстані. Однак, такі мітки дорожчі і мають обмежений термін служби батареї.

Зазвичай, RFID-мітка складається з антени (часто багатовиткової) і чіпа. Чіп містить електронні компоненти, необхідні для прийому та передачі радіосигналу, а також для зберігання даних. У активних мітках також присутнє джерело живлення.

Активні RFID-мітки, завдяки власному джерелу живлення, значно перевершують пасивні за дальністю зчитування та стійкістю до зовнішніх впливів. Вони здатні працювати в складних умовах, таких як вода, метал або на великих відстанях, завдяки потужнішому сигналу. Крім того, активні мітки можуть бути оснащені різноманітними сенсорами для моніторингу температури, вологості, тиску та інших параметрів. Термін служби батареї таких міток може досягати 10 років.

Пасивні RFID-мітки живляться від енергії зчитувача, що обмежує їх дальність дії. Однак вони є більш економічними та довговічними, оскільки не мають вичерпуваних джерел живлення. Електромагнітна хвиля зчитувача індукує в антені мітки електричний струм, достатній для живлення мікросхеми і передачі відповідного сигналу.

У 2006 році компанія Hitachi представила надзвичайно мініатюрний RFID-чіп, названий μ -Chip. Він був тоншим за папір і мав розміри всього 0,15x0,15 мм. Цей маленький чіп міг зберігати унікальний 128-бітний код, який не можна було змінити після виробництва. Це означало, що кожен чіп був унікальним і міг бути пов'язаний з конкретним предметом. Такий мініатюрний розмір став можливим завдяки сучасній технології виробництва мікрочіпів. У 2007 році Hitachi пішла ще далі, представивши ще менший чіп, розміром всього 0,05x0,05 мм, який можна було вбудовувати навіть у папір.

Габарити RFID-міток значною мірою обумовлені розмірами зовнішньої антени, яка, як правило, перевищує розміри мікрочіпа в кілька разів. Незважаючи на це, завдяки оптимізації виробничих процесів і використанню таких технологій, як друкарське виробництво антен, вартість RFID-міток значно знизилася. Це дозволяє використовувати їх у великих масштабах, наприклад, у роздрібній торгівлі.

Сучасні технології виробництва RFID-міток, такі як Fluidic Self-Assembly (FSA) та PICA, дозволяють значно збільшити обсяги виробництва та знизити собівартість готових продуктів. Ці методи базуються на високоточному автоматизованому з'єднанні мікросхем з антенами. Процес FSA, наприклад, дозволяє виробляти понад 2 мільйони мікросхем на годину. Незважаючи на високу продуктивність, ключовою проблемою залишається точність монтажу мікромініатюрних компонентів. Саме тому компанії активно працюють над розробкою нових рішень, спрямованих на підвищення ефективності виробництва і зменшення собівартості RFID-міток.

Перспективним напрямком розвитку RFID-технологій є використання полімерних матеріалів для створення міток. Компанії PolyIC і Philips вже

продемонстрували успішні прототипи таких міток, що працюють на частоті 13.56 МГц. Масове виробництво таких міток методом ротаційного друку дозволить значно знизити їхню вартість і зробити їх більш доступними.

RFID-мітки працюють за принципом радіоетикеток: вони отримують енергію від зчитувача і відправляють йому назад закодовану інформацію. Залежно від типу мітки, ця інформація передається різними способами.

Принцип роботи пасивних RFID-міток заснований на взаємодії з електромагнітним полем зчитувача. Мітка індукуює в собі високочастотний струм, який використовується для живлення мікросхеми і модуляції відбитого сигналу.

Пасивні RFID-мітки використовують два основних методи модуляції: модуляцію зворотного розсіювання (для УВЧ і СВЧ діапазонів) та модуляцію навантаження (для ВЧ діапазону). У першому випадку мітка змінює фазу або амплітуду відбитого сигналу, а в другому - змінює опір антени.

Порівняння активних, пасивних і напівпасивних RFID-міток показує, що кожен тип має свої переваги і недоліки. Активні мітки відрізняються високою потужністю передавача і великою дальністю зчитування, але мають обмежений термін служби. Пасивні мітки, навпаки, мають практично необмежений термін служби, але вимагають більш потужних зчитувачів. Напівпасивні мітки є компромісним рішенням, що поєднує в собі переваги обох типів.

Способи запису інформації на RFID-мітки схожі на різні види дисків. Є мітки, на які інформацію можна записати лише один раз (як на компакт-диск), є такі, на які можна записати кілька разів (як на флешку), а є й такі, на які взагалі не можна нічого записати, тільки зчитувати (як на звичайному CD).

Типи пам'яті RFID-міток визначають можливість запису і перезапису інформації. Мітки типу Read Only призначені виключно для зчитування заводських налаштувань. Мітки типу WORM дозволяють одноразовий запис користувацьких даних. Мітки типу R/W забезпечують багаторазовий запис і зчитування інформації.

1.3. Принципи побудови точного землеробства

У розвинених аграрно-індустріальних країнах набуває популярності система точного землеробства (СТЗ), яка дозволяє отримувати продукцію вищої якості за нижчою собівартістю, а також зменшувати агротехногенне навантаження на довкілля завдяки скороченню використання пестицидів, добрив та інших матеріалів.

Точне землеробство (Precision Farming або Precision Agriculture) — це комплекс узгоджених заходів, спрямованих на оптимальне використання технологічних ресурсів (насіння, добрив, засобів захисту рослин, регуляторів росту) і проведення агротехнічних робіт. Воно враховує вимоги конкретних сільськогосподарських культур, стан ґрунту, екологічні аспекти, а також індивідуальні особливості кожної ділянки поля, що дозволяє досягти максимальної ефективності та зберегти довкілля.

Принципи точного землеробства надають новий підхід до використання інтенсивних технологій, зберігаючи якість довкілля. Це досягається завдяки реалізації адаптивного потенціалу видів, сортів та агробіоценозів, тобто їх здатності пристосовуватися до умов навколишнього середовища. Для розкриття цього потенціалу важливо максимально використовувати біологічні можливості рослин. Це дозволяє підвищувати продуктивність за сприятливих умов, а також збільшувати їх екологічну стійкість до таких факторів, як посухи, суховії, морози та низькі температури. У результаті підвищується врожайність сортів і агробіоценозів, що є ключовим фактором для збільшення продуктивності.

Впровадження точного землеробства відображає загальну тенденцію до використання інформаційних технологій у різних сферах діяльності. У сільському господарстві це дозволяє значно підвищити технічний та управлінський рівень завдяки оперативному та багатофакторному прийняттю рішень. Основним завданням є просторово-часова оптимізація умов для вирощування рослин, причому сучасне точне землеробство головним чином зосереджене на просторовій оптимізації.

Для досягнення цього необхідно:

1. Забезпечити рівномірне розташування рослин у полі, що при рядковій сівбі означає однакову відстань між ними. Це створює однакову площу і об'єм живлення.
2. Вносити добрива і пестициди таким чином, щоб забезпечити рівноцінні умови для всіх рослин.

Однак навіть найвища точність і рівномірність застосування технологічних матеріалів не гарантує однакових умов для рослин через варіабельність ґрунтових властивостей, заселеність шкідниками, бур'янистість тощо. Це може призводити до нерівномірності росту рослин, відмінностей у якості врожаю та різних строків дозрівання.

Вирішення цих проблем полягає в адаптації технологічних заходів до потреб рослин та фітосанітарного стану посівів на кожній ділянці поля. Для цього необхідно створювати детальні картограми, які містять дані про запаси поживних елементів, густоту бур'янів, стан рослин, потенційну врожайність та інші показники.

Точне землеробство включає:

1. **Детальне картографування поля** з урахуванням основних агротехнічних параметрів.
2. **Координатне прив'язування машинно-тракторних агрегатів** до конкретних ділянок поля.
3. **Точне виконання технологічних операцій** відповідно до особливостей кожної елементарної ділянки.

Основні компоненти системи точного землеробства (СТЗ):

- **Географічна інформаційна система (GIS)** — комп'ютерна система, яка збирає та обробляє дані про агротехнічні параметри кожної ділянки поля.
- **Диференційована глобальна система позиціонування (DGPS)** — для точного визначення місця розташування техніки.
- **Технологія змінних норм внесення (VRT)** — для адаптивного внесення ресурсів залежно від умов конкретної ділянки.

Географічна інформаційна система (GIS) об'єднує апаратні засоби та програмне забезпечення, які дозволяють збирати й аналізувати дані про агротехнологічні показники ділянок поля. Інформація може бути отримана шляхом відбору проб у полі (наприклад, для аналізу агрохімічного складу ґрунту) із подальшою обробкою результатів і прив'язкою їх до точних координат.

Також використовуються оптичні пристрої з безконтактними датчиками, які в інфрачервоному діапазоні фотографують поля з літаків або супутників. Отримана інформація накопичується в базі даних і використовується для створення тематичних карт, наприклад, карт урожайності, вмісту поживних речовин або норм внесення добрив та інших матеріалів.

Диференційована глобальна система позиціонування (DGPS) — це радіонавігаційна супутникова система, яка забезпечує високоточне визначення місця розташування стаціонарних і рухомих об'єктів у тривимірному просторі (довгота, широта, висота) з точністю до кількох десятків сантиметрів. DGPS є вдосконалим варіантом глобальної системи позиціонування (GPS), яка має точність лише у межах десятків метрів.

Застосування DGPS для координатного прив'язування машинно-тракторних агрегатів у сільському господарстві обмежується через високу вартість обладнання, недостатній розвиток мережі станцій для диференціального коригування, а також похибки, спричинені природними факторами, такими як грозові розряди та магнітні бурі.

Технологія змінних норм внесення (VRT, Variable Rate Technology) — це метод внесення змінних доз технологічних матеріалів (добрив, пестицидів тощо) залежно від особливостей кожної ділянки поля. Вона реалізується за допомогою спеціального обладнання. Основою VRT є високоточна сільськогосподарська техніка, що оснащена сучасними електронними пристроями, такими як комп'ютери, мікропроцесори та датчики. (рис. 1.4).



Рис. 1.4. МТЗ-1221 зі встановленим Hydro-N-Sensor на даху і розкидачем AmazoneZA-M1500

Обприскувачі обладнані пристроями для електронного регулювання подачі робочого розчину пестицидів, сівалки – для регулювання норми висіву та глибини загортання насіння, машини для внесення добрив – регулювання доз внесення добрив, ґрунтообробні знаряддя – для регулювання глибини обробітку ґрунту. Керування робочим процесом і контроль за його виконанням здійснюють із трактора, обладнаного багатоканальним мікропроцесором або комп'ютером, а на сільськогосподарських машинах встановлюють уніфіковані датчики. На пульт керування надходить інформація щодо швидкості руху агрегату, обсягу виконаної роботи, витрат пального і запасів технологічних матеріалів тощо (рис. 1.5).



Рис. 1.5. Пульт керування

При неможливості впровадження системи точного землеробства за класичною схемою, вдаються до альтернативних підходів. Так, для визначення координат МТА використовують радіосистеми, які складаються з базової радіостанції, що знаходиться в приміщенні, та приймально-передавальних приладів, встановлених на польових агрегатах.

Українські вчені запропонували новий підхід до точного землеробства, який полягає у використанні цифрових зображень поля для створення детальних карт. Ці карти дозволяють точно визначити координати кожної точки поля відносно робочого органу сільськогосподарської машини. Завдяки цьому можна оптимізувати використання ресурсів, таких як добрива та пестициди, і підвищити ефективність виробництва.

В Україні у 2000 р. прийнято «Програму створення та впровадження технічних засобів для технологій точного землеробства», реалізація якої дала перші результати, створено мобільні машини для механічного відбирання проб ґрунту, електронно-механічні пристрої для зміни доз внесення добрив, машину для диференціального обробітку ґрунту, радіосистему для визначення координат агрегатів, з використанням базової радіостанції, та ін.

Нераціональне використання земельних ресурсів в Україні призвело до значної деградації ґрунтів. Втрата родючості ґрунтів є наслідком порушення природних процесів, що відбуваються в ґрунті, і призводить до збіднення ґрунтової біоти. Це, в свою чергу, негативно впливає на врожайність сільськогосподарських культур та екологічний стан довкілля. Для вирішення цієї проблеми необхідно перейти до більш екологічних технологій обробітку ґрунту, які забезпечать збереження родючості та стабільні врожаї. Ґрунтозахисні технології, що включають мінімальну обробку ґрунту, використання органічних добрив та сівозмін, можуть значно покращити стан ґрунтів та підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва.

Традиційні методи обробітку ґрунту на схилах, які передбачають глибоке орання, призводять до утворення щільного шару ґрунту, що погіршує його структуру та сприяє розвитку ерозії. Такий підхід призводить до втрати

родючого шару ґрунту, погіршення його водно-повітряного режиму та зменшення вмісту органічної речовини.

Ґрунтозахисні технології пропонують альтернативний підхід, який базується на мінімальному обробітку ґрунту на невелику глибину з використанням спеціальних знарядь. Такий підхід дозволяє зберегти на поверхні ґрунту рослинні залишки, які виконують роль мульчі, захищаючи ґрунт від ерозії та випаровування вологи. Крім того, мінімальний обробіток сприяє збереженню в ґрунті вологи та органічної речовини, що підвищує його родючість.

Впровадження ґрунтозахисних технологій дозволяє значно знизити витрати на виробництво сільськогосподарської продукції за рахунок економії пального, мінеральних добрив та пестицидів. Крім того, такі технології сприяють збереженню родючості ґрунту, зменшенню ерозії та підвищенню врожайності сільськогосподарських культур.

Надмірне використання мінеральних добрив та хімікатів у сільському господарстві призвело до деградації ґрунтів, вираженої в зниженні вмісту гумусу, погіршенні структури та зниженні біологічної активності. Відновлення родючості таких ґрунтів є складним і тривалим процесом.

Традиційно для відновлення родючості ґрунтів використовують органічні добрива, такі як гній. Однак, цей метод має ряд недоліків, зокрема, високу трудомісткість, ризик занесення патогенних мікроорганізмів та насіння бур'янів.

Перспективним напрямком у відновленні родючості ґрунтів є використання біогумусу. Біогумус – це високоякісне органічне добриво, яке отримують в результаті переробки органічних відходів дощовими черв'яками. Він містить велику кількість гумусу, біологічно активних речовин та мікроелементів, що сприяє покращенню фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунту.

Використання біогумусу як органічного добрива дозволяє підвищити родючість ґрунтів, врожайність сільськогосподарських культур та покращити якість продукції. Завдяки своїм властивостям, біогумус сприяє зменшенню

залежності від мінеральних добрив та пестицидів, що дозволяє отримувати екологічно чисту продукцію.

У багатьох розвинутих країнах, таких як Англія, Голландія та Німеччина, біогумус широко використовується в сільському господарстві. Завдяки його застосуванню вдалося досягти значних результатів у підвищенні врожайності зернових культур до 56-70 ц/га та картоплі – до 500-800 ц/га. В США понад 500 тисяч фермерських господарств перейшли на систему біологічного землеробства, що дозволило забезпечити підвищення якості та врожайності зернових культур до 60 ц/га, а кукурудзи на зерно – понад 100 ц/га.

Завдяки інноваційному підходу, зокрема, використанню біогумусу, Саудівській Аравії вдалося перетворити свої, здавалося б, непридатні для землеробства землі на продуктивні поля, що дозволяє їй не тільки забезпечити власну продовольчу безпеку, але й експортувати сільськогосподарську продукцію.

Обґрунтування ґрунтозахисних технологій.

Традиційна система обробітку ґрунту, що передбачає глибоке орання, призводить до порушення біологічної рівноваги в ґрунті. Перевертання орного шару призводить до змішування аеробних та анаеробних шарів, що спричиняє загибель значної частини ґрунтової біоти. Такий підхід, у поєднанні з інтенсивним використанням мінеральних добрив та пестицидів, призводить до деградації ґрунтів, ерозії та забруднення довкілля.

У зв'язку з цим, все більшої популярності набувають альтернативні системи землеробства, які базуються на мінімальному обробітку ґрунту, використанні органічних добрив та біологічних методів захисту рослин. Ці системи дозволяють зберегти родючість ґрунтів, покращити якість сільськогосподарської продукції та зменшити негативний вплив на довкілля.

Тривала практика оранки призвела до порушення мікробіологічної рівноваги в ґрунті, що негативно вплинуло на його родючість. Перехід до систем землеробства без обороту пласта сприяє відновленню ґрунтової біоти та підвищенню родючості ґрунтів.

Органічне землеробство – це система землеробства, яка базується на принципах збереження природних ресурсів та використання природних процесів для підвищення родючості ґрунтів. Основними елементами органічного землеробства є: мінімальний обробіток ґрунту, використання органічних добрив, сівоzmіни, біологічний захист рослин та відмова від синтетичних хімікатів.

Органічне землеробство передбачає раціональне використання сівоzmін, які враховують біологічні особливості культур, кліматичні умови та агротехнічні вимоги. Оптимальна структура сівоzmіни передбачає наявність 25-40% бобових культур та 40-50% зернових.

Ключовим елементом органічного землеробства є система обробітку ґрунту, яка базується на мінімальному втручанні у природні процеси. Відмова від оранки дозволяє зберегти структуру ґрунту, підвищити його водоутримуючу здатність та збільшити вміст органічної речовини.

Технологія прямої сівби (No-till) є ефективним інструментом збереження ґрунту та підвищення його родючості. Поверхневий покрив із пожнивних залишків захищає ґрунт від ерозії, регулює водний і температурний режими, а також сприяє накопиченню органічної речовини.

Компанія "Агро-Союз" з 2002 року стала лідером у впровадженні в Україні інноваційних методів обробітку землі, які дозволяють зберегти родючість ґрунту. Дослідження підтвердили, що з часом такі технології забезпечують стабільне підвищення врожайності. Після першого критичного періоду (4-5 років) спостерігається стабілізація врожайності на рівні 4,5-7 ц/га вище, ніж при традиційних методах обробітку.

Другий значний стрибок продуктивності (12-20 ц/га) спостерігається після 4-5 років стабільного застосування ґрунтозахисних технологій, коли ґрунт повністю відновлює свої природні властивості.

Через 8-9 років систематичного застосування ґрунтозахисних технологій ґрунт набуває властивостей, близьких до цілинних земель. Його продуктивність стає менш залежною від погодних умов, а середні прирости врожаю досягають 20-25 ц/га. Тривале використання ґрунтозахисних технологій (понад 15 років)

дозволяє подвоїти врожайність порівняно з традиційними системами землеробства.

Однією з відмінних рис ґрунтозахисних технологій є фокус на покращенні властивостей самого ґрунту, а не лише живлення рослин. За рахунок поліпшення фізичних, хімічних та біологічних властивостей ґрунт стає більш родючим і здатним забезпечити рослини усіма необхідними елементами живлення.

Багато фермерів спалюють соломку на полях, думаючи, що так удобрюють землю попелом. Але насправді це дуже шкідливо для ґрунту. Коли ми спалюємо соломку, ми втрачаємо багато корисних речовин, які потрібні рослинам для росту. Крім того, вогонь шкодить живим організмам у ґрунті, які роблять її родючою. Через кілька років такого "удобрення" земля стає менш родючою, і врожай зменшується.

Коли ми залишаємо соломку на полі, вона перегниває і стає добривом для наступних рослин. Це також допомагає зберегти вологу в ґрунті і захистити її від ерозії. Крім того, рослини, вирощені на таких полях, містять більше корисних речовин.

При мінімальному обробітку ґрунту спостерігається інтенсифікація процесів біологічної фіксації атмосферного азоту вільноживучими азотфіксуючими бактеріями, що сприяє поліпшенню азотного живлення рослин.

Внесення поживних залишків характеризується широким співвідношенням вуглецю до азоту. Для усунення депресивної дії поживних залишків та оптимізації процесів мінералізації органічної речовини рекомендується додаткове внесення азотних добрив з нормою 10 кг д.р. азоту на 1 га на кожні 10 см висоти поживних залишків. В умовах розвинутого тваринництва ефективним є застосування органічних добрив (рідкого гною) у співвідношенні 6-8 т на 1 т соломи.

Ґрунтозахисні технології сприяють значному поліпшенню фізичних властивостей ґрунту: підвищується структурність, знижується щільність, формується вертикальна орієнтація пор. Це суттєво покращує водопроникність та водоутримуючу здатність ґрунту, збільшує його несучу спроможність. На

поверхні ґрунту не утворюється кірка, а карбонати піднімаються ближче до поверхні.

Покриття ґрунту мульчею з поживних залишків сприяє оптимізації теплового режиму ґрунту, знижуючи випаровування вологи в літній період та зберігаючи тепло в зимовий. Важливим аспектом є також явище конденсації вологи в ґрунті, що забезпечує додаткове зволоження кореневої системи рослин.

Систематичне застосування ґрунтозахисних технологій призводить до підвищення врожайності сільськогосподарських культур та поліпшення їхньої якості. Зокрема, спостерігається збільшення вмісту білка та клейковини в зерні озимої пшениці, що підвищує її якісний клас. Також зростає вміст цукрів у коренеплодах цукрових буряків та плодах томатів.

Поживні залишки є важливим джерелом органічної речовини та поживних елементів для рослин. При розкладі соломи виділяється значна кількість вуглекислого газу, який, взаємодіючи з водою, утворює вуглекислий ангідрид, що сприяє мінералізації органічної речовини та підвищенню доступності поживних елементів для рослин.

Коли ми залишаємо соломку на полі, потрібно пам'ятати, що рослини потребують додаткового харчування. Крім того, солома може заважати діям гербіцидів, які ми використовуємо для боротьби з бур'янами. Тому важливо правильно обробляти поле і вносити гербіциди після того, як зійдуть посіви. Якщо солома розподілена по полю нерівномірно, це може негативно вплинути на ріст рослин і збільшити ризик хвороб.

Щоб отримати екологічно чисту продукцію, фермери використовують спеціальні методи захисту рослин. Ці методи дозволяють боротися зі шкідниками та хворобами, але при цьому не шкодять довкіллю. Перед тим, як застосовувати будь-які засоби захисту, фахівці прогнозують, які саме шкідники можуть з'явитися на полях, і обирають найбезпечніші способи боротьби з ними.

Впровадження ґрунтозахисних технологій супроводжується певними ризиками, які необхідно враховувати при плануванні виробничих процесів. Зокрема, в перші роки після переходу на безплужний обробіток може

спостерігатися відносна азотна недостатність, особливо на ґрунтах з низьким вмістом органічної речовини. Для її усунення рекомендується додаткове внесення азотних добрив навесні. Також існує ризик збільшення забур'яненості полів, що потребує застосування ефективних систем захисту рослин.

1.4. Мікросенсорні мережеві технології для моніторингу врожаю і мінімізації впливу хімічної обробки рослин

Сучасне сільське господарство прагне досягти балансу між отриманням високих врожаїв та збереженням природних ресурсів. Одним із шляхів до цього є впровадження стійких методів землеробства, які дозволяють зменшити витрати на виробництво, зберегти родючість ґрунту та знизити забруднення довкілля.

Як це працює? Завдяки новим технологіям фермери можуть вирощувати більше продуктів, використовуючи при цьому менше води та хімікатів. Це не тільки зменшує негативний вплив на природу, але й покращує якість продукції.

Щоб досягти таких результатів, науковці використовують різноманітні методи дослідження. Вони вивчають рослини, вимірюючи вміст у них хлорофілу (зеленого пігменту, необхідного для фотосинтезу), азоту (важливого елемента живлення) та інші показники. Також досліджують стан ґрунту: його щільність, кислотність, вміст органічних речовин та інші характеристики. Завдяки цим даним можна зрозуміти, які умови найкраще підходять для вирощування різних культур і як можна оптимізувати процес вирощування.

Уявіть собі поле, де кожна рослина отримує саме те, що їй потрібно. Це більше не фантастика, а реальність, яку роблять можливою сучасні технології. Завдяки спеціальним датчикам ми можемо точно визначити, які поживні речовини необхідні кожній ділянці поля, і застосовувати добрива саме там, де вони потрібні. Це дозволяє не тільки збільшити врожайність, але й зберегти природні ресурси та зменшити забруднення довкілля.

Спеціальні датчики, встановлені на сільськогосподарській техніці або безпосередньо в ґрунті, збирають дані про стан рослин і ґрунту. Вони вимірюють такі показники, як вміст азоту в листі, рівень вологості ґрунту, його кислотність та інші. Отримані дані обробляються за допомогою комп'ютерних програм, і на

їх основі створюються карти полів. Ці карти показують, де рослини потребують додаткового живлення, а де, навпаки, його надлишок.

На ринку представлений широкий асортимент датчиків для різних потреб. Деякі з них вимірюють стан рослин (наприклад, вміст хлорофілу, індекс вегетації), інші – характеристики ґрунту (кислотність, вологість, вміст органічних речовин). Серед найбільш відомих виробників датчиків можна назвати YARA, Agricon, Trimble, Holland Scientific, Fritzmeier, Topcon, Müller Elektronik, John Deere та Carl Zeiss.

Переваги використання датчиків:

- Збільшення врожайності: завдяки точному внесенню добрив рослини отримують оптимальне живлення.
- Зменшення витрат: скорочення використання добрив та інших засобів захисту рослин.
- Збереження навколишнього середовища: зменшення забруднення ґрунтових і поверхневих вод.
- Підвищення ефективності виробництва: оптимізація використання ресурсів.

Завдяки використанню датчиків сільське господарство стає більш точним, ефективним та екологічним. Це дозволяє виробляти більше продуктів харчування, використовуючи при цьому менше ресурсів.

Сьогодні сільське господарство переживає справжню революцію завдяки розвитку технологій. Якщо раніше фермери поклались на власні спостереження та ручні виміри, то зараз на допомогу приходять інноваційні рішення, які дозволяють отримувати точну інформацію про стан полів та культур.

Раніше для оцінки стану поля фермери використовували ручні прилади або датчики, встановлені на тракторах. Ці прилади дозволяли отримувати дані лише про обмежену кількість показників. Сьогодні ж ситуація кардинально змінилася. Завдяки розвитку спектроскопії та гіперспектральних зображень ми можемо отримати детальну інформацію про стан рослинності на всьому полі. Дрони,

обладнані спеціальними камерами, дозволяють створювати детальні карти полів, а сенсорні мережі, встановлені в ґрунті, надають інформацію про його вологість, температуру та інші параметри в режимі реального часу.

Завдяки отриманим даним фермери можуть точно визначити, які ділянки поля потребують додаткового підживлення, а де добрива можна зменшити. Це дозволяє не тільки збільшити врожайність, але й зберегти довкілля, зменшивши кількість використаних добрив.

Датчики вологості ґрунту допомагають визначити, коли рослинам потрібен полив, і який об'єм води необхідний. Це дозволяє ефективно використовувати водні ресурси та уникнути перезволоження або пересихання ґрунту.

За допомогою датчиків можна виявити захворювання рослин або шкідників на ранніх стадіях, що дозволяє вчасно вжити необхідних заходів.

Загалом, використання сучасних технологій дозволяє підвищити ефективність сільськогосподарського виробництва, зменшити витрати та отримати більш якісну продукцію.

Незважаючи на всі переваги, використання датчиків і сенсорних мереж має свої обмеження. Одним з основних є висока вартість обладнання та його встановлення. Крім того, для ефективної роботи систем необхідні фахівці, які вміють аналізувати великі обсяги даних.

Датчики і кабелі є перешкодою для роботи в полі (рис. 1.6)



Рис. 1.6. Датчики і кабелі є перешкодою для роботи в полі

Майбутня мета: бездротова біорозкладна сенсорна мережа (рис. 1.7). Сьогодні сільське господарство стає все більш технологічним. Уявіть собі поле, де кожна рослина має свій мікрочіп. Ці чіпи збирають інформацію про стан рослин і ґрунту і передають її фермеру. Завдяки цьому фермер може точно знати, коли рослинам потрібна вода, добрива або захист від шкідників. Це дозволяє вирощувати більше продуктів, витрачаючи менше ресурсів і зберігаючи природу. Базова станція з GSM-підключенням до центру управління у фермерів.

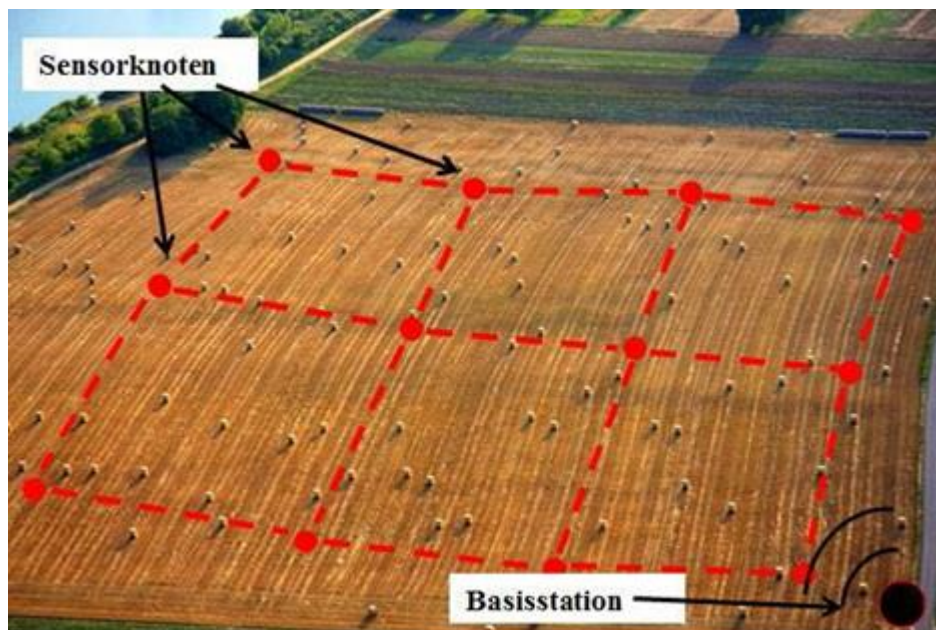


Рис. 1.7. Бездротова біорозкладна сенсорна мережа

Висновки до розділу

У подальших розділах роботи буде детально розглянуто принципи функціонування систем радіочастотної ідентифікації (RFID). Зокрема, буде проаналізована будова RFID-міток, методи модуляції та демодуляції радіосигналів, а також протоколи взаємодії між зчитувачем та міткою.

РОЗДІЛ 2. РАДІОЧАСТОТНА ІДЕНТИФІКАЦІЯ: ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА ЗАСТОСУВАННЯ

2.1. Принцип роботи RFID-систем

До складу системи входять: антена для прийому і передачі сигналу, що зчитує (зчитувач, рідер) і RFID-мітка для зберігання інформації.

Метод низькочастотної ідентифікації працює на несучих частотах від сотень кілогерц, до одиниць мегагерц. У нас в країні на це виділено 2 частотні зони: 125 кГц (LF), і 13,56 МГц (HF)(рис. 2.1).

RFID-система функціонує на основі електромагнітної індукції. Зчитувач генерує змінне електромагнітне поле, яке індукуює електричний струм в антени пасивної RFID-мітки. Отриманий струм живить мікросхему мітки, яка декодує команди зчитувача, обробляє дані та передає відповідь. Частота робочих сигналів RFID-систем може варіюватися від кількох кілогерц до декількох гігагерц, що впливає на дальність зчитування та обсяг зберігаємої інформації.

Принцип роботи міток гранично простий і описується як робота звичайного трансформатора. Всі ми знаємо що трансформатор - це елемент дозволяє змінювати величину протікає по ньому струму і поданого на його первинну обмотку напруги в співвідношенні кількості витків його первинної та вторинної обмотки $U_1 / U_2 = N_1 / N_2$. А ось імпеданс обмоток змінюється вже в зовсім іншій пропорції: $Z_1 / Z_2 = (N_1 / N_2)^2$. відповідно невелика зміна імпедансу в навантаженні буде явно виражена для опитувального пристрою. Відповідно отримуємо наступну систему: приймально- передавальний модуль, як антени у якого якась обмотка (первинна). Мітка - це чіп, з вторинною обмоткою відповідно. При тому, що піднесло зчитувача до мітки, через обмотку мітки починає текти струм і від нього живиться чіп, який змінюючи імпеданс в навантаженні обмотки передає інформацію зчитувача.

Найбільш функціональна, з представлених, технологія РЧІ на частоті 13,56 МГц. Вона має високу швидкість передачі даних і великими обсягами інформації, що зберігається на позначці (одиниці кілобайт).

Мінус цієї системи - мінімальна відстань зчитування інформації з мітки - зазвичай не перевищує 30 см, а середній показник не перевищує 10 см.

Технологія RFID, що працює на частоті 868 МГц, використовує зовсім інший принцип, ніж ті, що застосовуються в низькочастотних мітках. Вона базується на методах радіолокації, які вже давно використовуються в спеціальних службах, таких як розвідка. Уявіть собі, що мітка – це маленький відбивач, який повертає сигнал, який посилає зчитувач. Завдяки цьому можна точно визначити місцезнаходження мітки і отримати з неї інформацію. Цю технологію, яка колись використовувалася для дуже секретних завдань, тепер адаптували для широкого використання, зробивши її більш доступною та компактною.

Високочастотні RFID-системи працюють на принципі активного зондування простору. Уявіть собі, що RFID-мітка – це маленький радіопередавач, який відгукується на сигнал зчитувача. Зчитувач постійно посилає радіохвилі, і коли вони досягають мітки, вона їх "чує". Цей сигнал живить мітку, і вона може відповісти, відправивши свою інформацію назад. Це працює за принципом радіолокації: зчитувач посилає сигнал, а мітка його відбиває, змінюючи при цьому свою "видимість" для зчитувача.

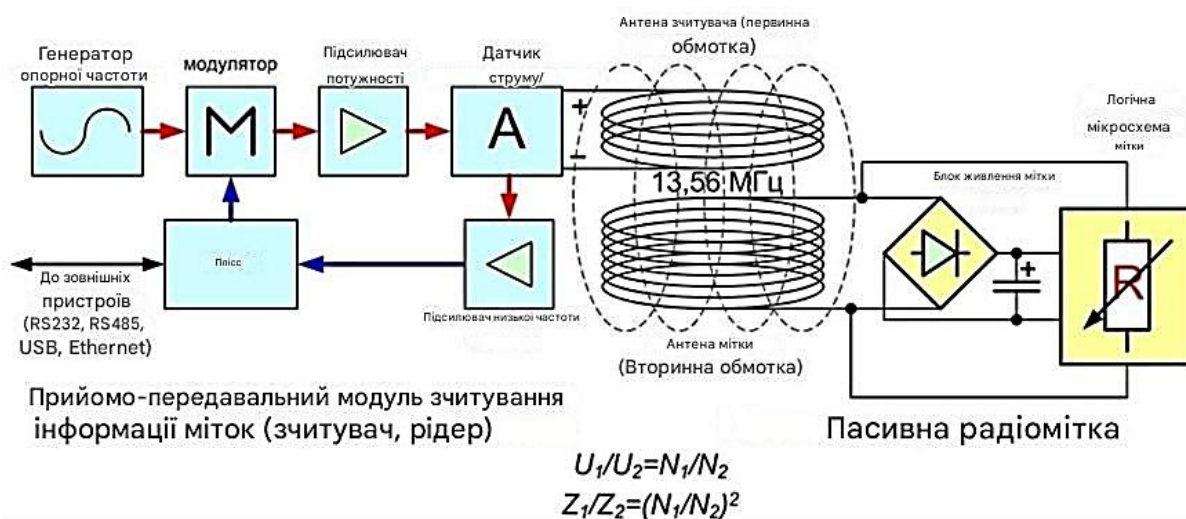


Рис. 2.1. Схема радіочастотної ідентифікації (РЧІ)

УВЧ RFID-системи забезпечують дальність зчитування пасивних міток до 10 метрів, хоча на практиці в промислових умовах зазвичай використовується відстань від 0,5 до 3 метрів. Такі системи здатні одночасно ідентифікувати до

кількох сотень міток зі швидкістю до кількох сотень зчитувань за секунду. Сучасні пасивні UHF-мітки можуть зберігати кілька кілобайт даних і оснащені вбудованими криптопроцесорами для захисту переданих даних.

Основними обмеженнями застосування технології УВЧ RFID є властивості матеріалів, що маркуються. Оптимальними для використання RFID є діелектричні матеріали. Для металевих та вологовмісних матеріалів розроблені спеціальні типи міток, що забезпечують достатню дальність зчитування. Незважаючи на ці обмеження, технологія УВЧ RFID є однією з найбільш перспективних технологій автоматичної ідентифікації та відстеження об'єктів у сучасній промисловості.

2.2. Технологія виробництва RFID-мітки

RFID-мітки – це маленькі електронні пристрої, які дозволяють ідентифікувати об'єкти безконтактним способом. Вони складаються з мікрочіпа, який містить інформацію про об'єкт, та антени для бездротового зв'язку зі зчитувачем. Принцип роботи досить простий: зчитувач посилає радіохвилі, які активують мітку. Мітка, у свою чергу, відсилає збережені дані назад до зчитувача.

Виробництво RFID-міток – це досить складний технологічний процес, який включає в себе нанесення мікрочіпа на підкладку та створення антени. Вибір матеріалів для мітки залежить від умов її експлуатації та необхідного рівня захисту даних. Сучасні технології дозволяють виробляти мітки різних форм і розмірів, що розширює сферу їх застосування.



Рис. 2.2. Радіочастотні мітки

Прогнозоване зростання ринку систем радіочастотної ідентифікації пов'язаний з давно очікуваним зниженням цін на RFID-мітки. Це стане можливим, якщо мітки будуть виготовлятися за технологією, яка передбачає масове виробництво і низьку собівартість. Недорогі мітки повинні бути якісними і надійними, оскільки в першу чергу планується їх використання для автоматичної ідентифікації товарних одиниць продукції. Не можна не враховувати і вимоги, пов'язані з екологічною безпекою. Передбачається, що кількість випущених міток буде обчислюватися мільярдами. У зв'язку з цим питання їх подальшої утилізації без шкоди для довкілля має вирішуватися вже сьогодні. Компанія Omron розробила нову технологію виробництва радіочастотних міток з урахуванням всіх вищевказаних вимог.

На рис. 2.3 і 2.4 представлені радіочастотні мітки для діапазону частот 13,56 МГц і 850-960 МГц, що випускаються сьогодні компанією Omron.

Технічні характеристики міток, які працюють на частотах 850-960 МГц, нового стандарту EPC Class 1 Gen 2, містяться в таблиці 2.1.

Обидва типи міток мають перемичку (Strap), яка представляє собою гнучку друковану плату зі встановленою мікросхемою, з'єднаної з контуром антени. За технологією JOMFUL проводиться монтаж мікросхеми на перемичку і з'єднання перемички з антеною.

Таблиця 2.1

Технічні характеристики міток

Характеристика	Gen 2 Wave (V750-D22M01-IM)	Gen 2 Loop (V750-D22M02-IM)
Розмір антени (мм)	94,0 x 16,0	70,0 x 68,0
Мікросхема	Impinj Monza EPC Class 1 Gen 2	Impinj Monza EPC Class 1 Gen 2
Тип пам'яті	MVN (EPC Area 96 біт)	MVN (EPC Area 96 біт)
Робоча частота (МГц)	850-960	850-960
Матеріал антени	Алюміній	Алюміній
Робоча температура (°C)	-20 до 55	-20 до 55

Характеристика	Gen 2 Wave (V750-D22M01-IM)	Gen 2 Loop (V750-D22M02-IM)
Область застосування	Універсальна/реєстрація упаковочних одиниць	Наявність в виробках металу, рідини/підвищена вологість/реєстрація палет

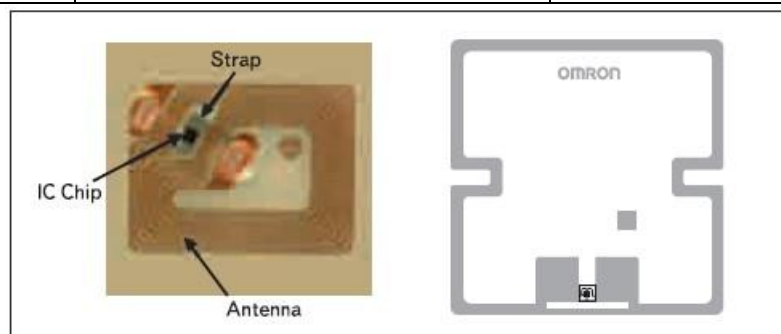


Рис. 2.2. Радіочастотні мітки для діапазону частот 13,56 МГц і 850-960 МГц

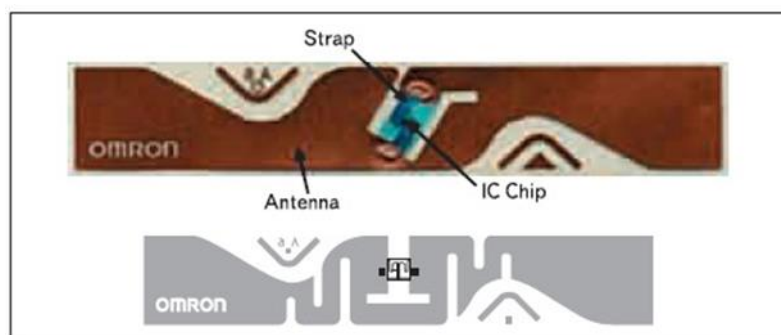


Рис. 2.3. Радіочастотні мітки для діапазону частот 13,56 МГц і 850-960 МГц

Технологія JOMFUL – це інноваційний метод з'єднання електронних компонентів, зокрема мікросхем, з гнучкими друкованими платами. Її назва походить від аббревіатури, що розшифровується як "Joint, Metal, Film, Ultrasonic" (з'єднання, метал, плівка, ультразвук).

Процес з'єднання відбувається за допомогою ультразвукових хвиль, які активують спеціальний шар термоплавкого клею на полімерній плівці. Під дією цих хвиль висновки мікросхеми проникають крізь клейкий шар і міцно з'єднуються з провідниками на платі. Цей метод забезпечує надійне з'єднання без необхідності високих температур, що дозволяє використовувати його для чутливих компонентів.

JOMFUL відкриває нові можливості в електроніці, особливо для створення гнучких та мініатюрних пристроїв. Завдяки своїм перевагам, ця технологія

знаходить застосування в різних галузях, таких як виробництво смартфонів, медичної електроніки та носімих пристроїв.

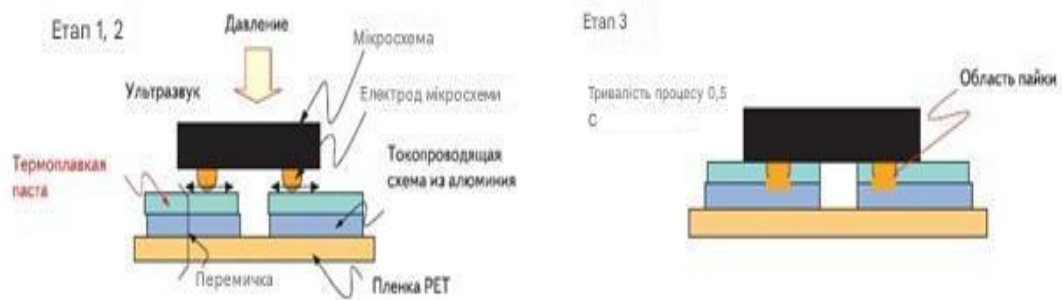


Рис. 2.4. Етапи монтажу

Технологія JOMFUL пропонує революційний підхід до з'єднання електронних компонентів, зокрема мікросхем, з гнучкими друкованими платами. Порівняно з традиційним методом, який використовує анізотропну токопроводячу пасту (АСР), JOMFUL демонструє значну перевагу в швидкості та ефективності.

Завдяки відсутності необхідності нанесення та висушування клею, технологія JOMFUL суттєво скорочує час виробництва. Це досягається за рахунок зменшення кількості технологічних операцій. Крім того, JOMFUL мінімізує ризик виникнення дефектів, що є особливо важливим для масового виробництва електроніки.

Таким чином, JOMFUL не лише пришвидшує виробничий процес, але й підвищує його надійність та знижує собівартість. Ці переваги роблять JOMFUL перспективною технологією для різних галузей, де швидкість, якість та економічність є ключовими факторами.

Технологія JOMFUL гарантує виняткову міцність з'єднань в електронних пристроях. Завдяки утворенню зварного шва, з'єднання між мікросхемами стають нерозривними, що забезпечує високу надійність навіть за екстремальних умов експлуатації. Результати тестів на вигин підтверджують, що пристрої, зібрані за технологією JOMFUL, здатні витримувати значно більші механічні навантаження порівняно з аналогами. Це робить JOMFUL ідеальним вибором для виробництва сучасних електронних пристроїв, які повинні бути не тільки функціональними, але й міцними та довговічними.

Зменшення розмірів мікросхем наступного покоління до значень менше 0,5 мм ставить нові виклики для забезпечення надійності з'єднань. Технологія JOMFUL пропонує ефективне рішення цієї проблеми завдяки утворенню міцного зварного шва. Результати тестів, проведених в екстремальних умовах температури та вологості, демонструють високу стійкість з'єднань, отриманих за допомогою JOMFUL, до зовнішніх впливів. Крім того, технологія JOMFUL успішно застосовується для виготовлення міток на паперових та полімерних підкладках, що підтверджує її універсальність та високу адаптивність до різних виробничих процесів.

При монтажі мікросхем на гнучкі плати утворюються так звані "паразитні ємності", які можуть впливати на якість сигналу. Технологія JOMFUL мінімізує вплив цих ємностей, забезпечуючи більш стабільні параметри з'єднання. Це дозволяє збільшити відстань стійкого зв'язку між RFID-міткою і зчитувачем, а також підвищити надійність роботи системи.

JOMFUL не використовує небезпечні матеріали. При АСР-методі застосовуються деякі види термічно тверднуть матеріалів - пластику на основі епоксидних зв'язуючих. Такі матеріали містять бісфенол А, що руйнує ендокринну систему людини. Подібні матеріали не повинні використовуватися при серійному виробництві радіочастотних міток, як забруднюють навколишнє середовище і завдають шкоди здоров'ю людей.

JOMFUL пропонує інноваційний підхід до з'єднання електронних компонентів, відмовившись від традиційної пайки. Замість розплавлення металу, JOMFUL використовує ультразвукові хвилі для створення міцного з'єднання. Цей процес включає в себе точне вирівнювання компонентів, їхнє з'єднання під дією ультразвуку та подальше ущільнення з'єднання за рахунок пластичної деформації матеріалів. Такий підхід забезпечує високу міцність з'єднання, відсутність термошоку та можливість роботи з різними матеріалами, включаючи тонкі плівки та гнучкі підкладки.

Технологія JOMFUL надає гнучкість у виборі матеріалів для виготовлення контуру антени та струмопровідних схем RFID-міток. Залежно від робочої

частоти мітки та вимог до вартості, можуть використовуватися мідь, алюміній або срібло. Вибір матеріалу впливає на такі характеристики мітки, як пропускна здатність, вартість виробництва та стійкість до корозії. Для міток, що працюють на частоті 13,56 МГц, оптимальним матеріалом для контуру антени є мідь, тоді як для міток, що працюють на більш високих частотах, часто використовується алюміній завдяки своїй доступності та хорошим електропровідним властивостям.



Рис. 2.5. Монтаж мікросхеми на гнучку плату

2.3. Гнучкі батареї

Розвиток технологій гнучких електронних пристроїв стимулює пошук нових рішень для створення гнучких акумуляторних батарей. Традиційні конструкції гнучких батарей мали ряд недоліків, пов'язаних з використанням полімерних підкладок і низькопродуктивних матеріалів.

Дослідники з KAIST запропонували новий підхід, який дозволяє створювати більш ефективні та довговічні гнучкі літій-іонні батареї. Замість традиційних полімерних підкладок, в новій батареї використовується тонка пластина з неорганічного матеріалу, що забезпечує високу стабільність при циклічному згинанні і високих температурах. Активні матеріали батареї (анод, катод і електроліт) наносяться на пластину у вигляді тонких шарів, що дозволяє зменшити загальну товщину батареї.

Експериментальні дослідження гнучких батарей демонструють високу стійкість їх електрохімічних характеристик до механічних деформацій. Зокрема, при значних згинах спостерігається незначне зниження ємності (не більше 7%) та практично не змінюється напруга розряду.

Для масштабного виробництва гнучких батарей необхідна розробка ефективних методів розділення шарів активних матеріалів. Перспективним

напрямком досліджень є застосування лазерних технологій для делямінації багат шарових структур.

Дослідницька група з Технологічного інституту Нью-Джерсі представила власну розробку гнучкої батареї, що базується на пластиковій підкладці, просоченій електроактивними компонентами. В якості активних матеріалів використовуються мікро- та наночастинки, зокрема солі літію для літій-іонних батарей та сполуки цинку з діоксидом марганцю для лужних батарей.

Представлений прототип гнучкої батареї являє собою еластичний контейнер, що містить два електроди: пористий графітовий електрод та алюмінієвий струмозбірник. Електролітом слугує сольовий розчин. Завдяки використанню графіту, батарея демонструє високу швидкість заряджання та відмінні показники безпеки порівняно з літій-іонними аналогами, хоча й має вдвічі меншу номінальну напругу. Незважаючи на перспективні результати, масштабне виробництво таких батарей вимагатиме додаткових досліджень та розробок.

Компанія LG Chem розробила прототип гнучкої літій-іонної батареї у вигляді кабелю. Завдяки спіральній конструкції всіх компонентів, включаючи катод з літій-кобальтового оксиду, анод та сепаратор, батарея демонструє високу гнучкість, що дозволяє використовувати її в нових формах-факторах, наприклад, в текстилі. Інноваційним рішенням є використання тонких мідних дрітків, покритих сплавом нікелю та олова, в якості катодного струмозбірника.

Такі нитки сплітаються в більш товсте волокно, воно обертається навколо стрижня діаметром 1,5 мм. З видаленням стрижня залишається вельми гнучка і міцна спіраль майбутнього анода. Поверх спіралі намотується алюмінієва стрічка, після чого занурюється в рідкий розчин окису літію-кобальту, щоб створити катод акумулятора. Конструкцію, закривають захисною обгорткою, а центральна порожнина наповнюється рідким електролітом. Щільність зберігання енергії і напруга повністю відповідає звичайним літій-іонним батареям, але вони більш гнучкі і тонкі.

В основі більшості створюваних гнучких акумуляторів лежать полімерні електроди. Вони наділені структурою, яка нагадує в'язку текучу рідину. В результаті їх можна згинати.

Крім того, вони відрізняються екологічною безпекою. Викликано це тим, що нові гнучкі акумуляторні батареї не містять електроліту(рис. 2.6).



Рис. 2.6. Гнучкі батареї

Гнучкі літій-іонні акумулятори наразі проходять стадію прототипування. Результати експериментальних досліджень свідчать про високу механічну стійкість та збереження електрохімічних характеристик при багаторазових циклах деформації. Отримані дані дозволяють прогнозувати успішне комерціалізацію цієї технології в найближчому майбутньому.

Але є компанії, які продовжують лінійку вже існуючих акумуляторів, створюючи зразки літій-іонних батарей, що мають здатність до деформації. Так в гнучких батареях компанії Panasonic застосовується внутрішня структура проводки і багат шарові зовнішні корпуси, які уникають перегріву або витoku електроліту. Корпус акумулятора захищає ламінована оболонка.

Гнучкі акумуляторні батареї Panasonic мають товщину в 0,55 мм, вони можуть згинатися так, що по кривій вони закручуються в радіус 25 мм. Батареї Panasonic тримають заряд в межах 17,5-60 мАг. Для сучасних смартфонів цієї потужності поки не вистачає, але винахід вже сьогодні можна успішно використовувати для малопотужних пристроїв, наприклад, смарт-одягу або смарт-карт.

Сучасні тенденції в галузі електроніки демонструють зростаючий інтерес до гнучких пристроїв. Провідні виробники, включаючи LG, Samsung та

Panasonic, активно інвестують у розробку гнучких акумуляторів, дисплеїв та інших компонентів. Передбачається, що в найближчі роки ринок мобільних пристроїв відійде від традиційних форм-факторів та перейде до виробництва пристроїв з нестандартними формами, що забезпечується розвитком технологій гнучких матеріалів та компонентів.

Особливості та види

Ультратонкі цинк-полімерні батареї від компанії Imprint Energy, одержувані методом промислового трафаретного друку. У них застосовується новітній особливо твердий полімерний електроліт, який виключає замикання, дозволяє збільшити ємність і стабільність джерела живлення.

Акумуляторні батареї на основі літєвих порошків, вуглецевих нанотрубок, в тому числі паперової підкладки Kimwipes. Такі акумулятори виділяються хорошою провідністю і стабільною потужністю.

Батареї на основі літій-іонних акумуляторів, що дозволяють згинати їх в довільних напрямках.

Акумуляторні батареї на основі алюміній-іонних осередків. Цей прототип об'єднує графітовий катод і алюмінієвий анод.

Волокнисті суперконденсатори, що складаються зі звичайного паперу або іншого волокнистого матеріалу, які покриваються складом з срібних нанопроводників і вуглецевих нанотрубок. Такі батареї можна гнути, м'яти і занурювати в кислотні розчини. Кожен кубічний міліметр волокна батарей може зберігати до 6,3 мВт енергії.

Гнучкі батареї демонструють низку переваг, що роблять їх перспективними для широкого спектру застосувань. Серед них можна виділити:

- Високу енергетичну щільність. Значна кількість енергії, що зберігається в одиниці маси та об'єму, дозволяє створювати компактні та легкі пристрої.
- Відсутність ефекту пам'яті. Можливість часткової зарядки без шкоди для ємності.
- Стабільну напругу розряду. Мінімальні коливання напруги під час

віддачі енергії.

- Широкий температурний діапазон роботи. Здатність функціонувати в широкому діапазоні температур.
- Висока гнучкість. Можливість створення батарей різноманітних форм і розмірів завдяки малій товщині активних елементів (від 1 мм).

Разом з тим, гнучкі батареї мають певні обмеження, які потребують подальших досліджень:

- Старіння. Поступове зниження ємності з часом та кількістю циклів заряд-розряд.
- Висока вартість виробництва. На даному етапі технологія виробництва гнучких батарей є досить дорогою.
- Необхідність додаткових досліджень. Потреба у подальших наукових дослідженнях для оптимізації характеристик та розширення діапазону застосувань.

Гнучкі батареї, завдяки своїм унікальним властивостям, відкривають нові перспективи для розвитку електроніки та інших галузей. Їх застосування обіцяє революціонізувати наш повсякденний світ, створюючи пристрої з нестандартними формами та функціями.

Однією з найбільш перспективних сфер застосування гнучких батарей є носима електроніка. Уявіть собі смарт-годинники, які інтегруються безпосередньо в шкіру, або текстиль, що здатний заряджати мобільні пристрої. Гнучкі батареї дозволять створювати пристрої, які будуть невід'ємною частиною нашого одягу та тіла.

Мобільні телефони, планшети та ноутбуки також відчують вплив гнучких технологій. Завдяки гнучким батареям, ці пристрої стануть більш компактними, легкими та енергоефективними. Крім того, з'являться можливості для створення пристроїв з нестандартними формами, які легко складаються або розгортаються.

Гнучкі батареї є ключовим компонентом для розвитку "розумних" матеріалів та Інтернету речей. Вони дозволять створювати самозаряджувані

сенсори, актуатори та інші елементи "розумних" систем, які будуть використовуватися в промисловості, будівництві та побуті.

У сфері медицини гнучкі батареї відкривають нові можливості для створення імплантованих медичних пристроїв з тривалим терміном служби. Це можуть бути штучні органи, кардіостимулятори та інші пристрої, які забезпечують автономне живлення.

Легкість і гнучкість гнучких батарей роблять їх перспективними для використання в аерокосмічній промисловості. Вони можуть бути використані для створення легких і компактних джерел живлення для супутників, космічних кораблів та інших космічних апаратів.

Крім гнучких батарей, великі перспективи мають гнучкі суперконденсатори. Ці пристрої відрізняються високою швидкістю заряджання та розряджання, що дозволяє використовувати їх для створення високошвидкісних зарядних пристроїв, резервних джерел живлення та інших застосувань, де потрібна висока потужність за короткий проміжок часу. Гнучкі акумуляторні батареї ляжуть в основу створення інтелектуального одягу з вбудованою електронікою, імплантованих медичних пристроїв нового покоління та електромобілів з підвищеною енергоефективністю.

Висновок до розділу

Аналіз принципів роботи RFID-систем та особливостей виробництва RFID-міток, зокрема з використанням гнучких батарей, свідчить про значний потенціал цієї технології. Поєднання радіочастотної ідентифікації з інноваційними матеріалами та джерелами живлення відкриває нові горизонти для створення інтелектуальних систем управління та моніторингу. Незважаючи на досягнуті успіхи, подальший розвиток RFID-технологій потребує вирішення таких завдань, як підвищення енергоефективності, мініатюризація пристроїв та забезпечення безпеки даних. Загалом, RFID-системи є перспективним напрямком досліджень, який має значний вплив на різноманітні галузі промисловості та повсякденне життя.

Вибір типу RFID-міток залежить від поставлених завдань і умов середовища, в якому вони використовуватимуться. Для нашого завдання оптимальним варіантом є пасивні RFID-мітки високочастотного діапазону, оскільки вони забезпечують найбільшу дальність дії (до 10 м) і мають низьку вартість. Більш дорогим варіантом є активні RFID-мітки, які оснащені захисним корпусом, портативним джерелом живлення і мають більший обсяг пам'яті. Вони здатні працювати на значно більших відстанях (до 200 м). У зв'язку з цим доцільно перевірити алгоритм роботи з обома типами RFID-міток.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ RFID-МІТОК НА ОСНОВІ RSS-ВИМІРЮВАНЬ

Оцінка відстані до пасивних RFID-міток є фундаментальною задачею у багатьох системах локалізації. За останні роки було запропоновано широкий спектр методів, які використовують різноманітні фізичні принципи та моделі поширення радіосигналів.

3.1. Методи визначення дальності

3.1.1. RSS (Received Signal Strength)

Одним з найпоширеніших методів визначення дальності є аналіз рівня прийнятого сигналу (RSS). Цей метод базується на емпіричному спостереженні, що потужність радіосигналу зменшується зі збільшенням відстані до передавача. За допомогою моделі поширення, яка враховує втрати в середовищі поширення, затінення та інші ефекти, можна встановити залежність між виміряною потужністю сигналу та відстанню до мітки.

Найчастіше використовується модель Патла:

$$P_i = P_0 - 10 * a * \log_{10}(R_i/R_0) + v_i, \quad (3.1)$$

де:

P_i - виміряна i -м датчиком потужність сигналу RFID-мітки, розташованої на відстані R_i ;

P_0 - відома потужність сигналу на відстані R_0 ;

a - коефіцієнт затухання, який залежить від характеристик середовища;

v_i - випадкова похибка вимірювання.

Використовуючи дані, отримані від кількох датчиків, можна побудувати декілька кіл, центри яких співпадають з розташуванням датчиків, а радіуси визначаються за виміряними значеннями потужності сигналу. Точка перетину цих кіл і буде орієнтовним розташуванням RFID-мітки. Цей метод відомий як трилатерація.

Метод визначення координат об'єктів за допомогою аналізу рівня прийнятого сигналу (RSS) набув широкого застосування завдяки своїй

економічній ефективності. Використання RSS не вимагає додаткового обладнання, що робить його привабливим рішенням для багатьох застосувань.

Однак, незважаючи на свою простоту, RSS-метод має значний недолік: висока чутливість до особливостей середовища поширення радіосигналу. Ідеальна модель поширення, що передбачає сферичну симетрію сигналу, часто не відповідає реальним умовам. На практиці, поширення сигналу зазнає впливу таких факторів, як багатошляховість, затінення, відбиття від поверхонь та інші нелінійності. Це призводить до значних відхилень виміряного рівня сигналу від теоретично розрахованого, що, в свою чергу, знижує точність визначення координат.

Для підвищення точності RSS-локалізації необхідно враховувати вплив факторів середовища. Це може бути досягнуто шляхом:

Калібрування: визначення емпіричних моделей поширення сигналу для конкретного середовища.

Фільтрації: використання методів фільтрації для згладжування вимірних даних та зниження впливу шумів.

Комбінування з іншими методами: об'єднання RSS-методу з іншими методами локалізації, такими як TDOA (Time Difference of Arrival) або AOA (Angle of Arrival), для отримання більш точних результатів.

3.1.2. AoA (Angle of Arrival)

Техніка визначення кута прийому (AoA), також відома як визначення напрямку прибуття (DoA), дозволяє локалізувати RFID-мітку шляхом точного вимірювання кута, під яким радіосигнал надходить на приймальний датчик. Застосовуючи геометричні принципи, можна визначити місцезнаходження мітки на основі перетину двох ліній, проведених від кожного датчика під кутом, що відповідає напрямку прийому сигналу. Це представлено на рисунку 2.1.

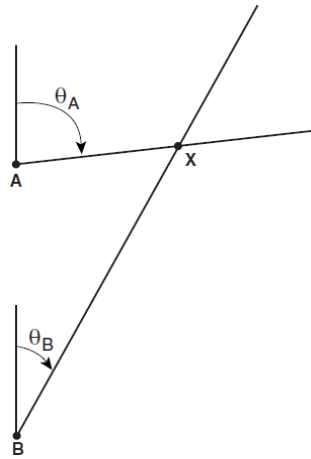


Рис. 3.1. Метод АОА

Для визначення координат об'єкта в двовимірному просторі за допомогою методу АоА необхідно мінімум два приймальних датчики. Збільшення кількості датчиків до трьох і більше дозволяє підвищити точність локалізації за принципом триангуляції.

У ідеальних умовах, коли відсутні перешкоди та багатошляховість, напрямлені антени, встановлені на приймачах, можуть бути точно орієнтовані на джерело сигналу (RFID-мітку). Кути, під якими антени приймають сигнал (θ_A і θ_B), визначають напрямки на мітку від кожного датчика. Перетин цих напрямків дозволяє визначити точне місцезнаходження мітки.

У сучасних комерційних та військових системах, що використовують метод визначення кута прийому (АоА), замість механічно рухомих антен застосовують багатоеlementні антенні решітки. Сигнал, прийнятий кожним елементом решітки, обробляється електронним шляхом. Завдяки математичним обчисленням, що виконуються обчислювальною системою, визначається кут, під яким сигнал прибув до антени. Цей процес передбачає вимірювання різниці часу прибуття (TDOA) сигналу до різних елементів решітки, що виявляється у вигляді різниці фаз прийнятих сигналів. Завдяки цій різниці фаз можна визначити напрямок приходу сигналу. Цей метод, який іноді називають "зворотним формуванням променя", дозволяє безпосередньо вимірювати час прибуття сигналу на кожен елемент антени.

Одним із класичних прикладів реалізації методу визначення кута приходу (АоА) є система всенаправлених радіонавігаційних маяків УКХ діапазону

(VOR). Діапазон частот VOR становить від 108,1 до 117,95 МГц. Принцип роботи VOR полягає в тому, що наземні радіомаяки випромінюють кілька радіальних сигналів у різних азимутах. Бортовий приймач літака, приймаючи ці сигнали, визначає свій азимут відносно маяка. Використовуючи дані прийому від кількох маяків VOR, бортова система навігації за допомогою тригонометричних розрахунків визначає точні координати літака.

Методи визначення кута приходу сигналу (AoA) широко застосовувалися на ранніх етапах розвитку мобільних мереж для визначення місцезнаходження абонента, особливо в екстрених ситуаціях. Принцип полягав у тому, що кілька базових станцій визначали напрямок на мобільний телефон за кутом приходу сигналу. Потім, використовуючи методи триангуляції, обчислювалися точні координати абонента. Однак, ця технологія має суттєві обмеження, пов'язані з впливом багатопляховості. У міських умовах, де сигнали можуть відбиватися від будівель та інших об'єктів, точність визначення координат за допомогою AoA значно знижується. Це робить даний метод малоефективним у приміщеннях та густонаселених районах.

3.1.3. ToA (Time of Arrival)

Метод визначення часу прибуття сигналу (ToA) є одним із фундаментальних методів локалізації, що базується на точному вимірюванні часу, за який сигнал долає відстань від джерела до приймача. У системах радіочастотної ідентифікації (RFID) цей метод використовується для визначення відстані між RFID-міткою та зчитувальним пристроєм.

Принцип роботи методу ToA полягає в тому, що RFID-мітка передає сигнал з відомим часом початку, а зчитувальний пристрій фіксує момент прибуття цього сигналу. Визначивши час поширення сигналу, можна розрахувати відстань між міткою та зчитувачем, оскільки швидкість поширення електромагнітних хвиль є відомою константою.

Однак, для забезпечення високої точності вимірювань відстаней за допомогою методу ToA необхідна надзвичайно висока точність вимірювання часу. Це вимагає використання високоточних годинників та складних систем

синхронізації, які забезпечують синхронну роботу всіх елементів системи. Основна складність полягає в необхідності синхронізувати годинники RFID-мітки та зчитувального пристрою з точністю до наносекунд.

Таким чином, метод ToA є потужним інструментом для визначення відстаней, але його ефективність безпосередньо залежить від точності вимірювання часу та наявності високоточної синхронізації.

Виміряні за допомогою методу ToA відстані до RFID-мітки від кожного приймального датчика можна уявити як радіуси кіл. Центром кожного кола є відповідний датчик. Таким чином, реальне місцезнаходження мітки має лежати на перетині цих кіл. Якщо ми маємо дані від двох датчиків, то отримуємо дві можливі точки перетину кіл, тобто два потенційних місця розташування мітки. Для усунення неоднозначності та підвищення точності локалізації використовують дані від трьох датчиків. У цьому випадку кола перетинаються в одній точці, що однозначно визначає положення RFID-мітки (див. рис. 3.2).

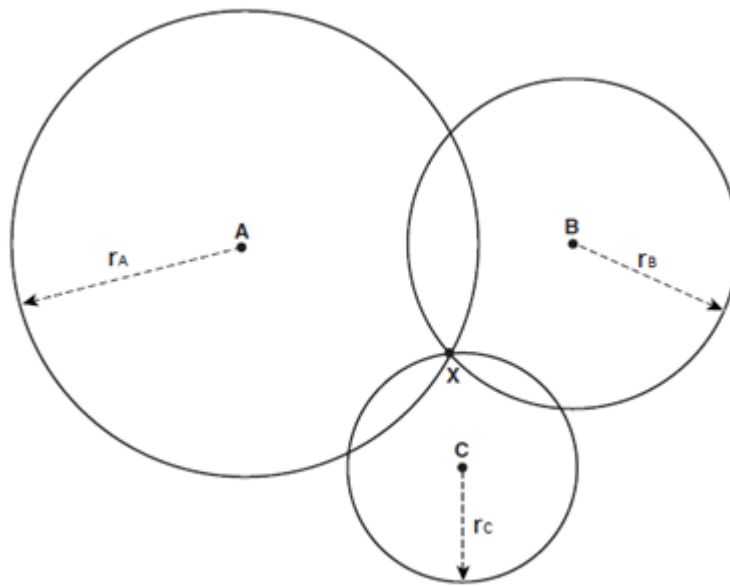


Рис. 3.2. Метод ТОА

Час поширення сигналу від станції X до датчиків A, B та C вимірюється з високою точністю і позначається як t_A , t_B та t_C відповідно. Знаючи швидкість поширення сигналу, можна розрахувати відстані від станції X до кожного датчика (r_A , r_B , r_C). Кожна така відстань визначає коло з центром у відповідному датчику, на якому розташована станція X. Перетин цих трьох кіл і вказує на точне місцезнаходження станції X. Однак, в деяких випадках, особливо при

наявності перешкод або багатошляховості, можуть виникати ситуації, коли три кола перетинаються в декількох точках. Для усунення такої неоднозначності використовують додаткові датчики, що дозволяє отримати більш точну локалізацію.

Метод визначення часу прибуття сигналу (ToA) гнучкий та може бути застосований як для двовимірної, так і для тривимірної локалізації об'єктів. У тривимірному просторі замість кіл використовуються сфери, що дозволяє визначити не тільки координати на площині, а й висоту об'єкта. Однак, основною проблемою методу ToA є необхідність надзвичайно точної синхронізації годинників усіх пристроїв, зокрема RFID-мітки. Навіть незначні відхилення в часі, наприклад, 100 наносекунд, можуть призвести до значних похибок у визначенні координат, досягаючи кількох десятків метрів. Тому метод ToA найкраще працює в середовищах з мінімальними перешкодами та багашляховістю.

3.1.4. TDoA (Time Difference of Arrival)

Метод визначення різниці часу прибуття сигналу (TDoA) базується на порівнянні моментів прийому сигналу різними датчиками. На відміну від методу ToA, TDoA не вимагає абсолютної синхронізації годинників, а лише їхньої відносної синхронізації. Це значно спрощує реалізацію системи. Математично, метод TDOA зводиться до задачі гіперболічної латерації, яка полягає у визначенні точки перетину гіпербол, що відповідають різницям у часі прибуття сигналу. Для однозначного визначення позиції об'єкта необхідні щонайменше три синхронізовані датчики. Використання додаткових датчиків дозволяє підвищити точність локалізації та вирішити неоднозначні ситуації, які можуть виникнути при використанні лише трьох датчиків.

Сучасні розробки в галузі систем TDoA дозволяють значно послабити вимоги до точної синхронізації годинників приймачів. Одним із таких підходів є використання періодичної калібровки годинників за допомогою зовнішнього джерела часу. Це дозволяє обчислити похибку місцевого годинника і внести відповідні корективи. Інший інноваційний метод передбачає обмін спеціальними

синхронізуючими пакетами між приймачами. Аналізуючи час прибуття цих пакетів, можна визначити відносні зсуви годинників і внести необхідні корективи. Обидва ці підходи дозволяють знизити вимоги до абсолютної точності синхронізації годинників, що значно спрощує реалізацію систем TDoA.

Системи аеропортів є класичним прикладом застосування технології TDoA. У сфері мобільного зв'язку TDoA відомий як E-OTD (Enhanced Observed Time Difference) і забезпечує високу точність визначення розташування, особливо в сільській місцевості (до 60 метрів) та навіть у міських умовах з великими перешкодами (до 20 метрів).

Як ToA, так і TDoA мають схожі переваги та недоліки. Обидві технології добре зарекомендували себе у великомасштабних системах зовнішнього позиціонування, таких як системи навігації транспортних засобів. Також, вони ефективні в напіввідкритих просторах, як-от стадіони та амфітеатри, а також у зовнішніх умовах, наприклад, на автостоянках. У приміщеннях TDoA демонструє найкращі результати у великих відкритих приміщеннях з високими стелями.

Як системи ToA, так і TDoA зазвичай вимагають додаткового обладнання, яке встановлюється паралельно до основної інфраструктури зв'язку. Часто це обладнання інтегрується в загальні корпуси разом з іншими пристроями, такими як точки доступу.

У закритих приміщеннях, особливо в умовах тісних просторів, точність роботи систем ToA та TDoA помітно знижується через багатопрохідність сигналу, тобто множинні відбиття від стін, меблів та інших об'єктів. Цей ефект особливо виражений у вузькосмугових системах TDoA.

Серед методів визначення координат радіоміток найбільшу популярність набув метод, заснований на вимірюванні рівня прийнятого сигналу (RSS) [3-7].

3.2. Методи розрахунку координат

Розглянуті вище методи дозволяють визначити відстань до RFID-мітки, проте для ефективного відстеження її руху необхідно знати точні координати в просторі. Це дозволить точно відображати положення мітки на екрані монітора.

Для цього необхідно розробляти алгоритми, які здатні швидко обчислювати координати RFID-мітки в реальному часі, відстежуючи зміни її положення.

3.2.1. МНК – метод найменших квадратів

Метод найменших квадратів (МНК) – це математичний алгоритм, який дозволяє знайти найкраще наближення до заданої сукупності даних за допомогою кривої. Крива вважається найкращою, якщо сума квадратів відхилень точок даних від цієї кривої є мінімальною. Використання квадратів відхилень, а не їх абсолютних значень, робить цю функцію диференційовною, що спрощує математичний апарат для знаходження мінімуму. Однак, оскільки відхилення підносяться до квадрату, точки, які віддалені від кривої, мають більший вплив на результат, ніж близькі точки. Це може бути як перевагою, так і недоліком залежно від конкретної задачі.

Метод найменших квадратів є найпоширенішим і найпростішим способом побудови лінійної регресії. Його основна задача – знайти пряму лінію, яка найкраще описує залежність між двома змінними. Навіть якщо залежність між даними не є лінійною, часто застосовують різні математичні перетворення, щоб звести її до лінійного вигляду. Це дозволяє використовувати стандартні формули методу найменших квадратів для обчислення параметрів моделі. Варто зазначити, що формули методу найменших квадратів незалежно розробили Гаусс та Лежандр.

Для задач нелінійної регресії часто застосовують ітеративні методи, які зводять нелінійну функцію до послідовності лінійних задач. Тобто, на кожному кроці ми лінеаризуємо функцію в околі попереднього рішення і застосовуємо до лінеаризованої моделі звичайні методи найменших квадратів. Однак, існують підходи, які дозволяють уникнути ітерацій. Ми можемо спробувати лінеаризувати вихідну нелінійну функцію відразу і застосувати до неї лінійні методи. Такий підхід, хоча й порушує деякі статистичні припущення, часто дає задовільні результати. Для обчислення параметрів моделі в цьому випадку можна використовувати метод псевдооберненої матриці. Важливо зазначити, що якість отриманих результатів сильно залежить від вибору початкового

наближення та виду нелінійності. Крім того, якщо для кожної точки даних відомі її похибки, то можна застосовувати зважені найменші квадрати, надаючи більшу вагу більш точним точкам.

Основними даними для визначення координат об'єкта є оцінки різниці відстаней між об'єктом та кількома приймачами (R_i), а також відомі координати цих приймачів (x_i, y_i, z_i).

Для початкової оцінки прямокутних координат об'єкта (x, y, z) використовується система рівнянь, яка базується на наступних співвідношеннях:

$$r_i^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = (R_i + r)^2 \quad (3.2)$$

де:

- r_i – відстань між i -м приймачем та об'єктом;
- $i = 1, 2, \dots, n-1$; n – загальна кількість приймачів;
- x, y, z – невідомі координати об'єкта;
- x_i, y_i, z_i – відомі координати i -го приймача;
- r – відстань від об'єкта до початку координат;
- R_i – різниця відстаней між об'єктом та парами приймачів.

Після деяких алгебраїчних перетворень отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь, яку можна записати у матричному вигляді:

$$A \cdot \omega = 0.5 \cdot b \quad (3.3)$$

де A — матриця розміру $(n-1) \times 1$, 1 – кількість досліджуваних величин

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & R_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & R_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n-1} & y_{n-1} & z_{n-1} & R_{n-1} \end{bmatrix}$$

ω — вектор 1×1 ,

$$\omega = \begin{bmatrix} x & y & z & r \end{bmatrix}$$

b — вектор $(n-1) \times 1$

$$b = \begin{bmatrix} x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - R_1^2 \\ x_2^2 + y_2^2 + z_2^2 - R_2^2 \\ \dots \\ x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 + z_{n-1}^2 - R_{n-1}^2 \end{bmatrix}$$

Для розв'язання цієї системи рівнянь зазвичай застосовується метод найменших квадратів. Оптимальне значення вектора невідомих параметрів w знаходиться за формулою:

$$\omega = 0.5 \left(A^T A \right)^{-1} A^T b \quad (3.4)$$

3.2.2. Формули Байєса

Формула Байєса є потужним інструментом статистичного висновування, який дозволяє оновлювати ймовірнісні оцінки за наявності нових даних. У контексті визначення місцеположення RFID-міток вона дозволяє об'єднати інформацію з різних датчиків та покращити точність оцінки.

Нехай A та B – це різні датчики, які визначають місцеположення RFID-мітки. Тоді за теоремою Байєса маємо:

$$P(A|B) = (P(B|A) * P(A)) / P(B) \quad (3.5)$$

де:

- $P(A|B)$ – умовна ймовірність того, що мітка знаходиться в положенні A , за умови, що датчик B показав це положення;
- $P(B|A)$ – умовна ймовірність того, що датчик B покаже положення A , за умови, що мітка дійсно знаходиться в положенні A ;
- $P(A)$ – ймовірність того, що мітка знаходиться в положенні A ;
- $P(B)$ – ймовірність того, що датчик B покаже будь-яке положення.

Іншими словами, формула Байєса дозволяє обчислити ймовірність того, що наше припущення про місцеположення мітки є правильним, виходячи з даних, отриманих від датчика.

Якщо ми маємо кілька датчиків B_1, B_2, \dots, B_n , то формулу Байєса можна узагальнити таким чином:

$$P(A|B_1, B_2, \dots, B_n) = (P(B_1, B_2, \dots, B_n|A) * P(A)) / P(B_1, B_2, \dots, B_n)$$

Припускаючи, що події B_1, B_2, \dots, B_n є незалежними за умови A , отримаємо:

$$P(A|B_1, B_2, \dots, B_n) = (P(A) * \prod_i P(B_i|A)) / P(B_1, B_2, \dots, B_n)$$

Ця формула дозволяє об'єднати інформацію від всіх датчиків для отримання більш точної оцінки місцеположення RFID-мітки.

В рамках байєсівського підходу невідомі параметри моделі розглядаються як випадкові величини, що мають певний розподіл ймовірностей. Цей розподіл відображає наше початкове уявлення про можливі значення параметрів і називається а пріорним розподілом. Після отримання нових даних ми оновлюємо наше уявлення про значення параметрів, обчислюючи апостеріорний розподіл ймовірностей за допомогою теореми Байєса.

Апостеріорний розподіл $W(x|\theta)$ характеризує ймовірність того, що параметр θ має значення x , з урахуванням отриманих даних. Математичне очікування цього розподілу є точковою оцінкою параметра θ . Таким чином, байєсівська оцінка є не просто точковим значенням, а повним розподілом ймовірностей, що відображає невизначеність щодо оцінюваного параметра.

Для визначення місцеположення RFID-міток байєсівський підхід дозволяє об'єднати інформацію з різних джерел, таких як показання датчиків, а пріорі знання про можливі місця розташування міток та інші допоміжні дані.

Процес байєсівської оцінки в цьому випадку включає такі етапи:

1. Формулювання моделі. Створення математичної моделі, яка описує залежність між спостережуваними даними (наприклад, сигналами від датчиків) та невідомими параметрами (координатами RFID-мітки).
2. Вибір а пріорного розподілу. Визначення початкового розподілу ймовірностей для невідомих параметрів на основі наявної а пріорі інформації.
3. Обчислення апостеріорного розподілу. Застосування теореми Байєса для оновлення а пріорного розподілу з урахуванням нових даних.
4. Отримання оцінки. Обчислення математичного очікування

апостеріорного розподілу для отримання точкової оцінки координат RFID-мітки.

Переваги байєсівського підходу:

- Гнучкість: можливість використання різноманітних типів а пріорних розподілів та моделей.
- Інтуїтивність: байєсівський підхід має природну інтерпретацію в термінах оновлення вірувань.
- Можливість об'єднання різних джерел інформації.
- Оцінка невизначеності: апостеріорний розподіл дозволяє оцінити невизначеність в оцінці параметрів.

Байєсівський підхід є потужним інструментом для визначення місцеположення RFID-міток, оскільки він дозволяє враховувати невизначеність в даних та використовувати а ріогі інформацію. Застосування байєсівського підходу дозволяє отримати більш точні та надійні оцінки координат RFID-міток.

3.2.3. Фільтр Калмана

Для опису руху об'єкта в дискретний момент часу k використовується лінійна модель стану:

$$u(k) = F(k, k-1)u(k-1) + G(k)\omega(k) \quad (3.6)$$

- $u(k)$ – вектор стану об'єкта в момент часу k (наприклад, координати, швидкість);
- $u(k-1)$ – вектор стану в попередній момент часу
- $F(k, k-1)$ – матриця переходу стану, що описує еволюцію стану системи з попереднього моменту часу;
- $G(k)$ – матриця, що пов'язує шум процесу $w(k)$ зі станом системи;
- $\omega(k)$ – вектор процесового шуму, який враховує невизначеності в моделі руху.

Рівняння, яке описує процес визначення місцеположення цілі, має вигляд

$$u_{\text{И}}(k) = H(k)u(k) + v(k) \quad (3.7)$$

де:

- $u_{\text{И}}(k)$ – вектор спостереження, який містить параметри цілі, які

вимірюються;

- $u(k)$ - вектор помилки вимірювання параметрів цілі
- $H(k)$ – матриця спостереження, що пов'язує стан системи з вимірюваннями;

За рівняннями (3.6), (3.7), синтезовано дискретний фільтр Калмана, який описується виразами [10,11].

$$u^*(k) = F(k, k-1)\hat{u}(k-1);$$

$$\hat{u}(k) = u^*(k) + K(k)(u_H(k) - H(k)u^*(k)),$$

де $u^*(k)$, $\hat{u}(k)$ вектори прогнозу і оцінки параметрів цілі в момент часу k

Оцінка стану отримана за допомогою фільтра Калмана, є оптимальною в сенсі мінімізації середньоквадратичної похибки. Коваріаційна матриця $P^*(k)$ характеризує точність оцінки. Ключовим параметром фільтра Калмана є коефіцієнт підсилення $K(k)$, який визначає, наскільки сильно нові вимірювання впливатимуть на оновлення оцінки стану. Величина $K(k)$ розраховується рекурсивно на кожному кроці фільтрації і залежить від точності попередньої оцінки та рівня шумів у вимірюваннях.

$$P^*(k) = F(k, k-1)\hat{P}(k-1)F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k);$$

$$K(k) = P^*(k)H^T(k)(H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k))^{-1};$$

$$\hat{P}(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k),$$

Де $P^*(k)$ - кореляційна матриця помилки прогнозу $\Delta u^*(k) = u^*(k) - u(k)$

$\hat{P}(k)$ — кореляційна матриця помилки оцінки $\Delta \hat{u}(k) = \hat{u}(k) - u(k)$

Початкова умова має вигляд $\hat{u}(0) = x(0), \hat{P}(0) = P(0)$

Структурна схема фільтра Калмана показана на рис. 3.3.

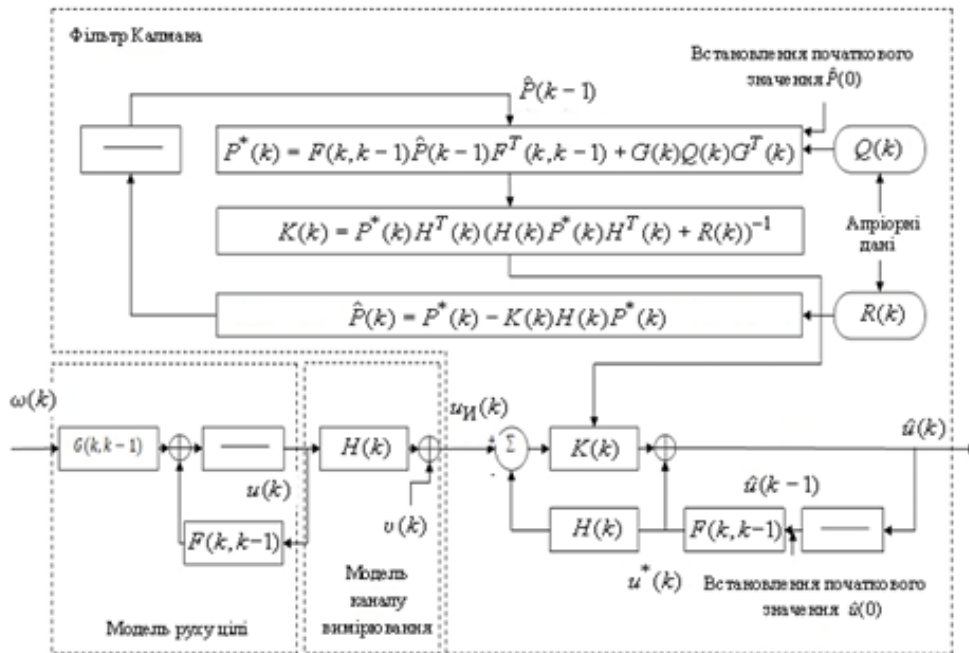


Рис. 3.3. Структурна схема фільтру Калмана

Білий гаусівський шум $\omega(k)$, який необхідний для формування вектора стану системи $u(k)$, представляється у вигляді випадкового процесу. Для його обробки використовується лінійний фільтр із параметрами, що змінюються залежно від часу. Формування збуджувального шуму відбувається через перетворення вектора $u(k)$ та накладання додаткового шуму $v(k)$.

Для запуску фільтрації задаються початкові значення $u(0)$ і $P(0)$. Ці значення базуються на повністю відомій початковій інформації про стан системи.

У процесі роботи фільтра ключову роль відіграють:

- кореляційні матриці шумів збудження $Q(k)$;
- матриця $G(k)$;
- перехідна матриця системи $F(k, k-1)$, яка визначає параметри, необхідні для фільтрації шумів.

Формування вимірювального вектора $u_m(k)$ відбувається за допомогою застосування цих параметрів і використання кореляційних характеристик шумів.

Фільтр Калмана є адаптивною системою, оскільки його характеристики змінюються залежно від змін вхідних даних та параметрів системи. Завдяки коефіцієнту підсилення $K(k)$ фільтр може відстежувати зміни в стані системи в реальному часі.

Процес оновлення оцінки стану складається з двох етапів:

1. *Прогнозування*: на цьому етапі здійснюється прогноз стану системи на наступний крок на основі попередньої оцінки та моделі переходу.
2. *Оновлення*: отримане прогнозне значення коригується з урахуванням нових вимірювань. Коефіцієнт підсилення $K(k)$ визначає, наскільки сильно коригується прогноз.

Величина коефіцієнта підсилення $K(k)$ залежить від співвідношення між інтенсивністю процесового шуму $w(k)$ та шуму вимірювань $v(k)$. При високому рівні шуму вимірювань фільтр більше довіряє моделі переходу і менше – новим вимірюванням, що призводить до зменшення $K(k)$. І навпаки, при високому рівні процесового шуму фільтр більше довіряє новим вимірюванням і збільшує $K(k)$.

При відсутності процесового шуму або при його зневажливо малій інтенсивності коефіцієнт підсилення $K(k)$ з часом прямує до нуля. Це означає, що фільтр переходить у режим прогнозування, тобто використовує лише модель системи для оцінки стану, не враховуючи нові вимірювання.

Фільтр Калмана є одним з найпоширеніших алгоритмів оцінки стану динамічних систем. Серед його основних переваг можна виділити наступні:

- Рекурсивність. Фільтр обчислює оцінку стану в реальному часі, використовуючи лише попередню оцінку та нове вимірювання. Це дозволяє ефективно обробляти потоки даних.
- Оптимальність. За умови, що модель системи та статистики шумів відомі точно, фільтр Калмана забезпечує мінімально середньоквадратичну похибку оцінки.
- Лінійність оцінки. Оцінка стану є лінійною комбінацією попередньої оцінки та нового вимірювання, що спрощує аналіз та реалізацію.
- Можливість попереднього розрахунку коефіцієнта підсилення. Коефіцієнт підсилення $K(k)$ може бути обчислений заздалегідь, якщо статистичні характеристики шумів відомі.

Незважаючи на свої переваги, фільтр Калмана має суттєвий недолік – розбіжність. Розбіжність виникає, коли фактичні похибки оцінки стають значно більшими за ті, що передбачаються фільтром. Причинами розбіжності можуть

бути:

- Неадекватність моделі: якщо модель системи неточно описує реальний процес, то оцінки фільтра можуть відхилятися від істинного значення стану.
- Нелінійності: лінеаризація нелінійних систем може призводити до втрати точності оцінки.
- Зміни параметрів системи: якщо параметри системи змінюються з часом, а фільтр не адаптується до цих змін, то може виникнути розбіжність.
- Помилки округлення: при цифровій реалізації фільтра помилки округлення можуть накопичуватися і призводити до розбіжності.

Для зменшення ризику розбіжності фільтра Калмана можна застосувати такі підходи:

- Адаптивні фільтри Калмана. В таких фільтрах параметри моделі і коваріаційні матриці шумів адаптуються в процесі роботи фільтра.
- Розширений фільтр Калмана. Цей фільтр використовується для оцінки стану нелінійних систем шляхом лінеаризації моделі в кожній точці траєкторії.
- Беззапаховий фільтр Калмана. Цей фільтр також призначений для нелінійних систем, але використовує інший підхід до лінеаризації.
- Частинки фільтр. Цей метод заснований на представленні розподілу ймовірностей стану сукупністю частинок.

Вибір конкретного методу залежить від особливостей задачі та вимог до точності оцінки.

Фільтр Калмана є ефективним інструментом для оцінки стану динамічних систем. Однак, для успішного застосування фільтра необхідно враховувати його обмеження та вибирати відповідний варіант фільтрації з урахуванням особливостей конкретної задачі.

Таким чином, актуальним науковим завданням є розробка алгоритму визначення місцеположення RFID-міток на основі RSS-вимірювань, який:

- буде адаптивним до змін умов середовища та зможе уточнювати координати міток на основі послідовно отриманих вимірювань;

- буде заснований на математичному апараті фільтрації Калмана, що дозволить враховувати невизначеність вимірювань;
- зможе працювати в умовах неповної інформації про параметри системи.

3.3. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення RFID-міток на основі RSS-вимірювань

Системи пасивної радіолокації характеризуються ізолініями середньоквадратичної помилки (СКВ) вимірювання дальності σ_r RFID-міток, які будуються у координатах x, y [14]. Діаграма ізоліній для середньоквадратичної помилки вимірювання різниці відстаней $\sigma_{\Delta m}$ створена для чотирьох моделей сенсорних мереж із різною кількістю датчиків, але однаковою кількістю RFID-міток, розташованих на сітці з кроком 1 м у кімнаті розміром 10x10 м.

Змодельовані ізолінії обмежують ділянки, де помилка не перевищує певного значення. Це дозволяє оцінити, на яких ділянках помилки зростають повільніше або швидше.

Перша модель (рис. 3.4) представляє сенсорну мережу, що складається з трьох датчиків, розташованих у точках: D_0 (-10; 10), D_1 (10; 10) і D_2 (0; -10). Ця кількість датчиків є мінімальною для визначення місцеположення RFID-міток та для функціонування пасивної радіолокації загалом.

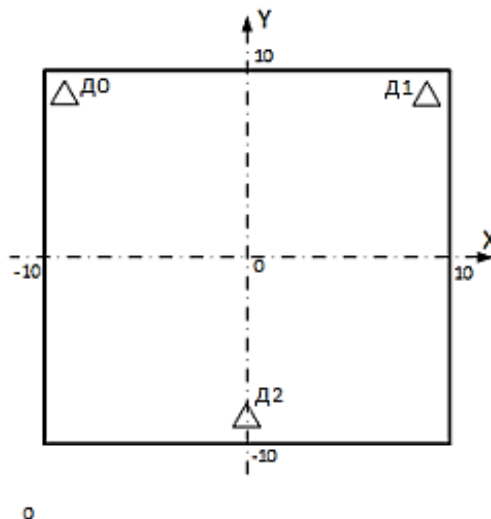


Рис. 3.4. Конфігурація сенсорної мережі з 3 датчиків

На рис. 3.5 для RSS-вимірювань спостерігається, що середньоквадратична помилка (СКВ) зростає найповільніше в центрі кімнати, тоді як біля датчиків

вона досягає найбільших значень. Значення СКВ для визначення місцеположення RFID-міток знаходяться в діапазоні $1.184 \leq \sigma_r \leq 2.187$ м.

Для кімнати такого розміру це досить велика похибка. Також помітно, що точність вимірювань вища у верхній частині рисунка, що пояснюється особливостями визначення відстаней за допомогою RSS-вимірювань.

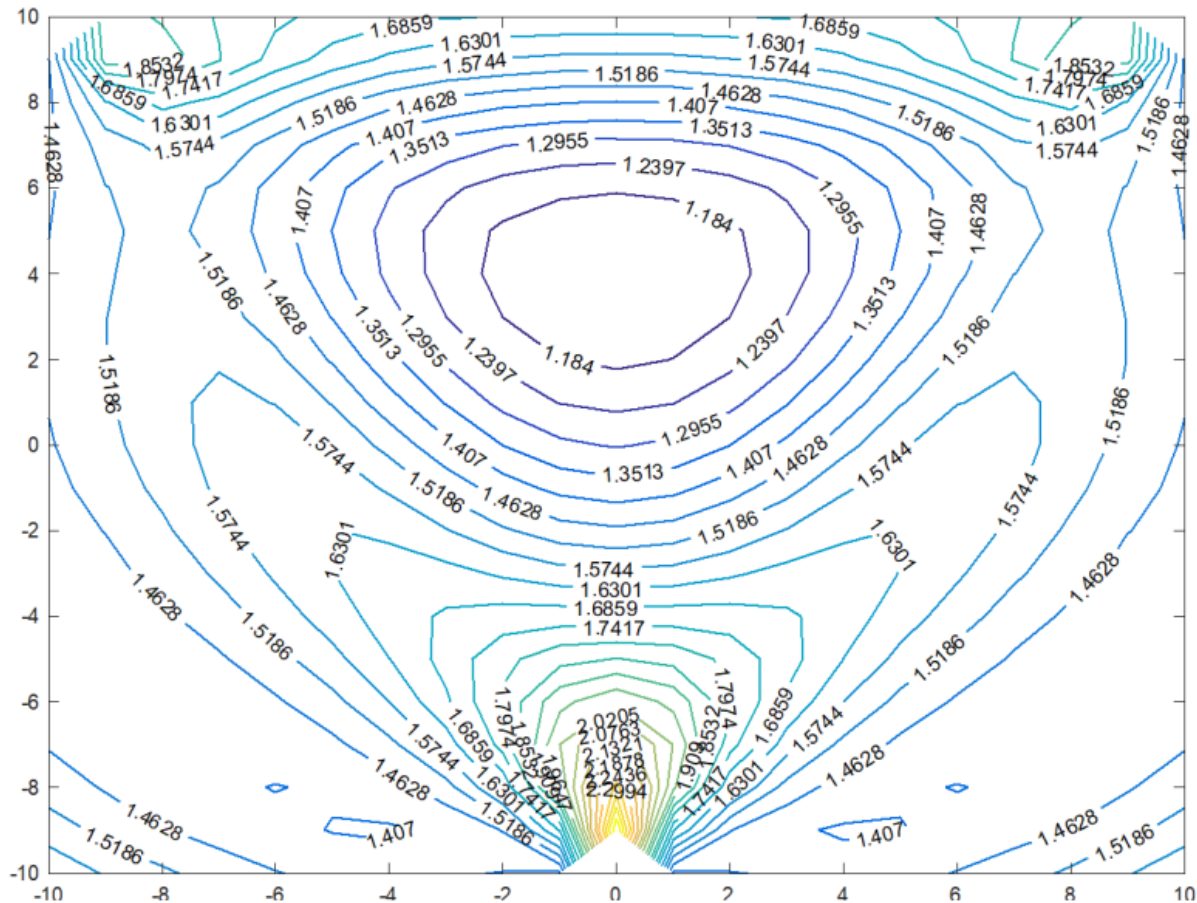


Рис. 3.5. RSS-вимірювання

Інша конфігурація сенсорної мережі зображена на рис. 3.6. Мережа складається з чотирьох датчиків, розташованих у кутах кімнати: D_0 (-10; 10), D_1 (10; 10), D_2 (10; -10), D_3 (-10; -10).

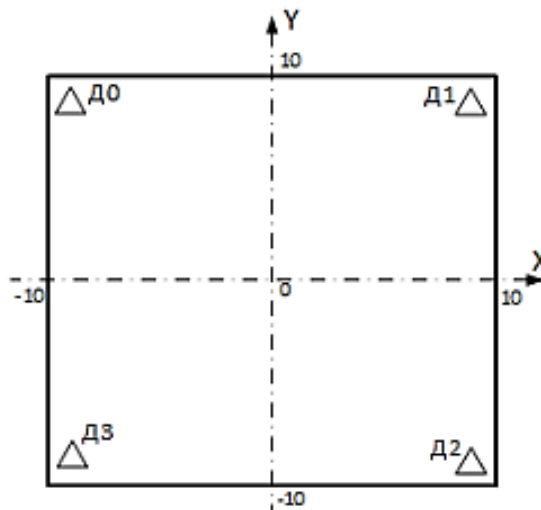


Рис. 3.6. Конфігурація сенсорної мережі з 4-ох датчиків

Для RSS-вимірювань, показаних на рис. 3.7, середнє квадратичне відхилення (СКВ) помилки визначення місцеположення RFID-міток становить у межах $0.97 \leq \sigma_r \leq 1.3$ м.

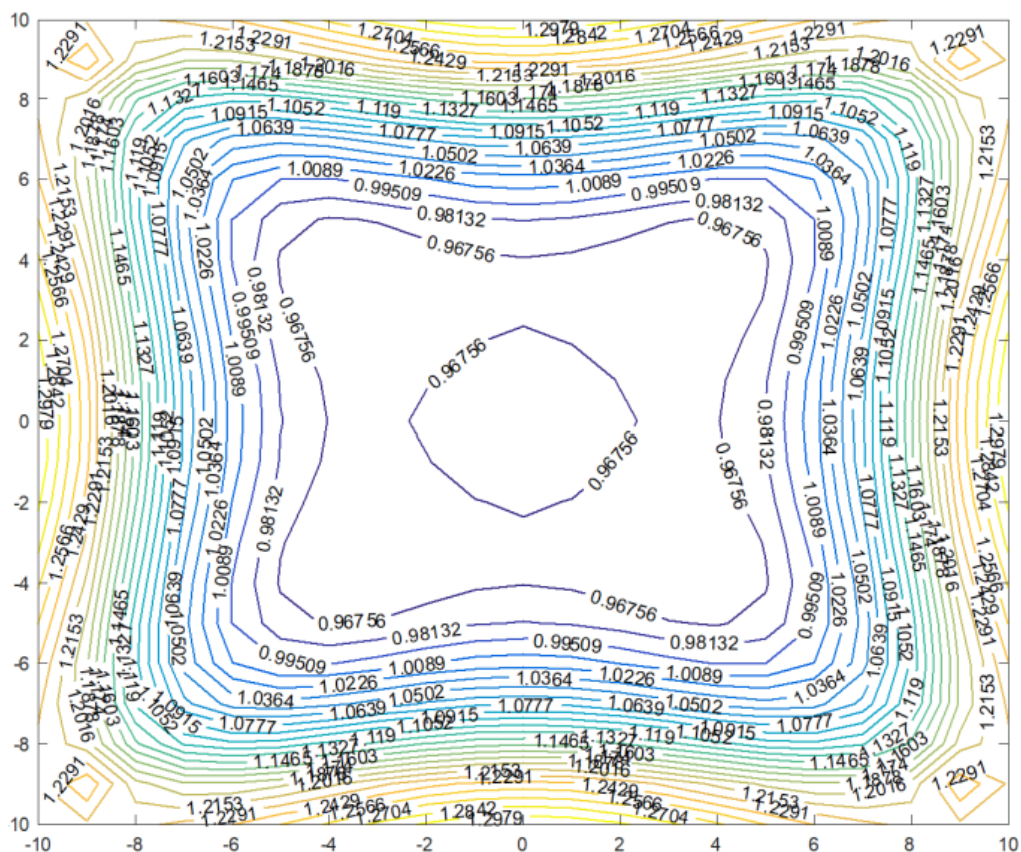


Рис. 3.7. RSS- вимірювання

У порівнянні з конфігурацією з трьома датчиками, ця має більш рівномірний розподіл СКВ помилки вимірювань, при цьому точність в центрі кімнати вища і охоплює більшу площу, а по краях кімнати точність зменшується.

Однак така кількість датчиків все ще не відповідає вимогам. Третя модель мережі, яка досліджується, представлена на рис. 3.8. Вона складається з восьми датчиків з координатами: D_0 (-10; 10), D_1 (0; 10), D_2 (10; 10), D_3 (10; 0), D_4 (10; -10), D_5 (0; -10), D_6 (-10; -10), D_7 (-10; 0).

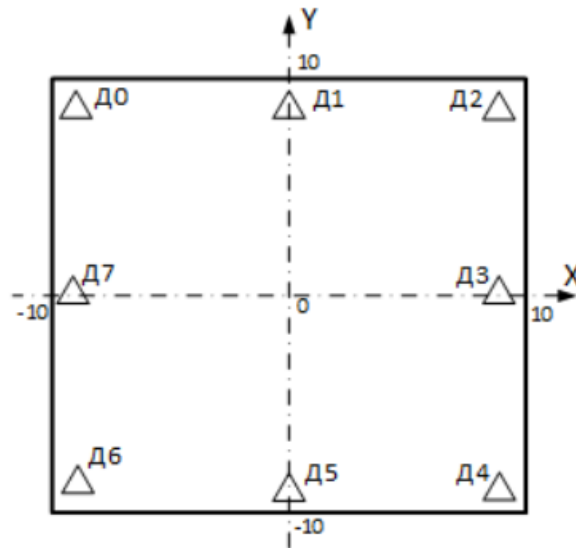


Рис.3.8. Конфігурація сенсорної мережі з 8-ми датчиків

Для RSS-вимірювань, представлених на рис. 3.9, СКВ помилки визначення місцеположення RFID-міток знаходиться в межах $0,46 \leq \sigma_r \leq 0,66$ м. Ця конфігурація забезпечує рівномірний розподіл СКВ помилки визначення місцеположення RFID-міток, причому площа з рівномірними значеннями значно більша порівняно з конфігурацією з чотирма датчиками. Однак на краях кімнати помилка не суттєво відрізняється від помилки в центрі. З'явилися ділянки, де точність на 10-12 см вища, ніж у центрі кімнати.

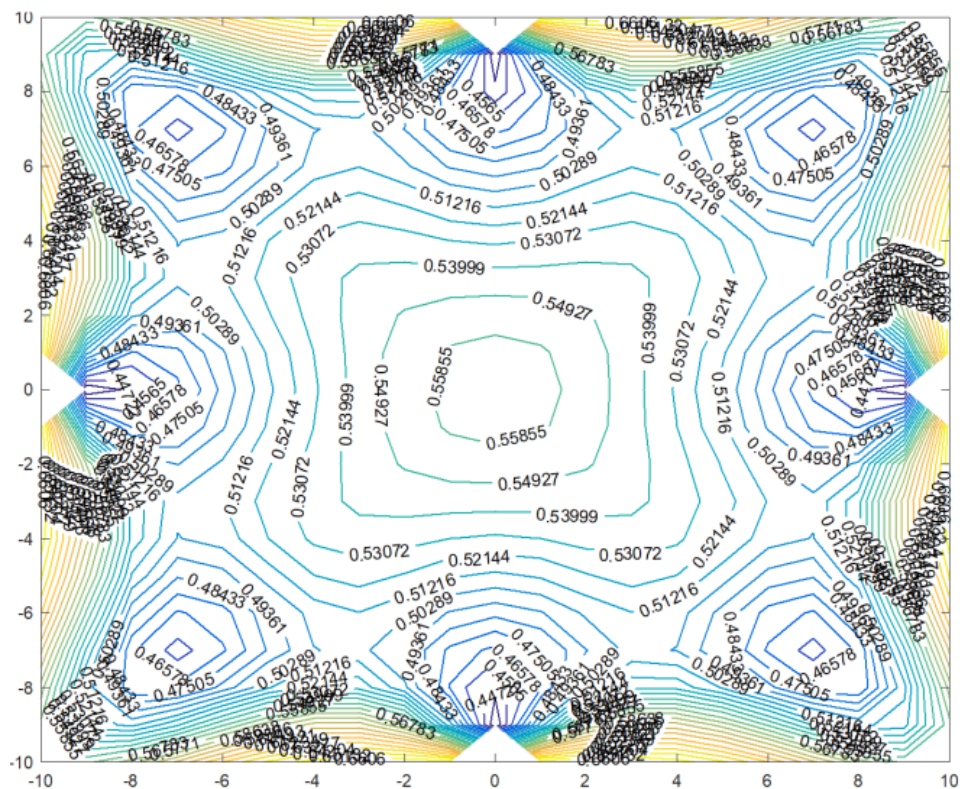


Рис. 3.9. RSS- вимірювання

Остання модель, що була досліджена, зображена на рис. 3.10. Ця мережа складається з дванадцяти датчиків з такими координатами: D_0 (-10; 10), D_1 (-3; 10), D_2 (3; 10), D_3 (10; 10), D_4 (10; 3), D_5 (10; -3), D_6 (10; -10), D_7 (3; -10), D_8 (-3; -10), D_9 (-10; -10), D_{10} (-10; -3), D_{11} (-10; 3).

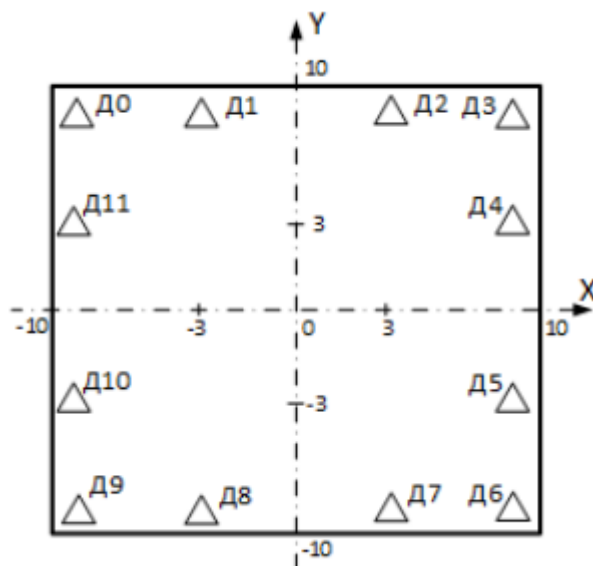
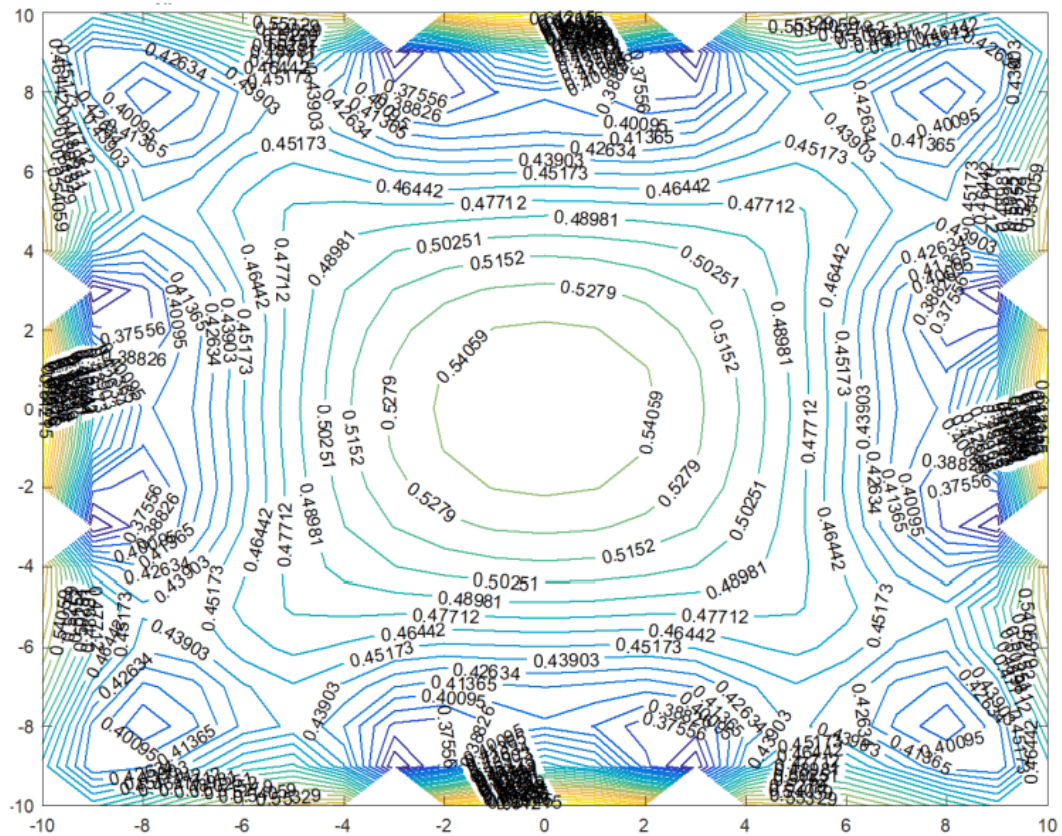


Рис. 3.10. Конфігурація сенсорної мережі з 12-ти датчиків

Для RSS-вимірювань, зображених на рис. 3.11, СКВ помилки визначення місцеположення RFID-міток знаходиться в межах $0,42 \leq \sigma_r \leq 0,60$ м. Ця

конфігурація має подібний розподіл СКВ помилки визначення місцеположення RFID-міток до розподілу для мережі з восьми датчиків, однак в центрі кімнати утворився острів, де СКВ помилки вищий, ніж на його краях. Також є ділянки з мінімальним значенням СКВ помилки.



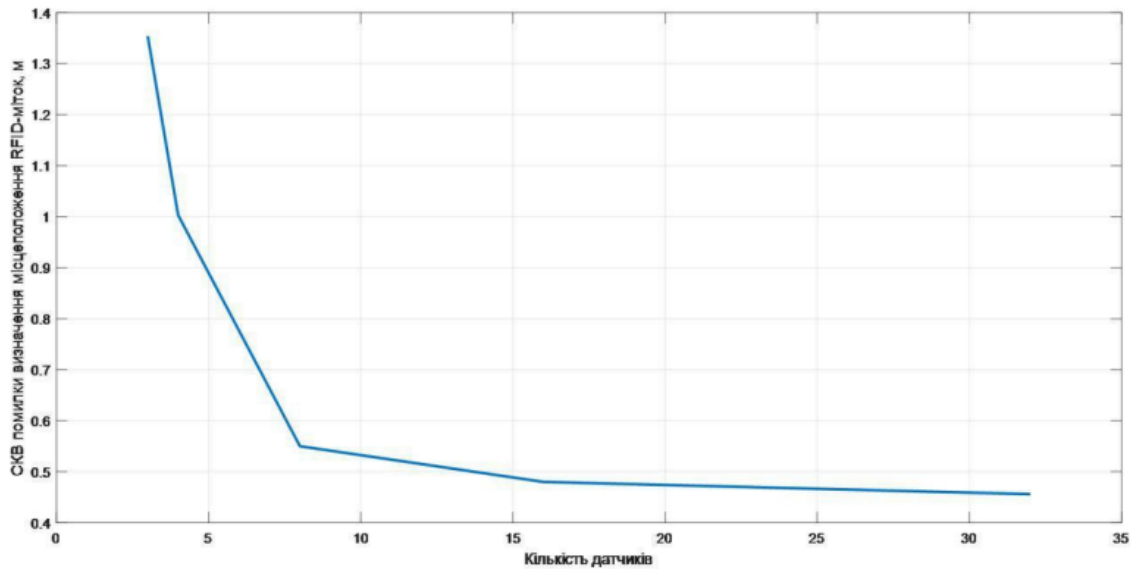


Рис. 3.12. Залежність зміни СКВ помилки від кількості датчиків

З цього рисунка видно, що збільшення кількості датчиків не призводить до значного зменшення СКВ помилки визначення місцезнаходження. Конфігурація з восьми датчиків забезпечує найбільш рівномірний розподіл СКВ помилки для даних умов.

Тож можемо зробити такі висновки:

1. Серед усіх розглянутих конфігурацій найкращою є топологія БСМ з восьми датчиків. Така конфігурація гарантує високу точність порівняно з меншою кількістю датчиків і є економічно вигідною, оскільки зростання кількості датчиків збільшує вартість системи.
2. Моделювання показало, що додавання більшої кількості датчиків не призводить до значного зниження СКВ помилки оцінки місцезнаходження.

3.4. Розробка алгоритму визначення місцезнаходження RFID-міток

На попередніх етапах роботи було детально розглянуто методи визначення відстані між RFID-мітками та датчиками за рівнем отриманого сигналу (RSS), а також методи обчислення координат міток на основі цих відстаней. Було також проведено аналіз необхідної кількості датчиків для забезпечення достатньої точності локалізації.

З метою підвищення точності визначення координат RFID-міток у динамічних умовах, пропонується використовувати алгоритм, заснований на

фільтрації Калмана. Цей метод дозволяє рекурсивно уточнювати оцінку стану системи (в даному випадку, координат мітки) на основі послідовно отриманих вимірювань, враховуючи при цьому невизначеність як самих вимірювань, так і моделі системи.

3.4.1. Розробка алгоритму

Оскільки ми розглядаємо статичні RFID-мітки, вектор стану системи в момент часу k зводиться до вектора координат мітки:

$$u^l = u^{l-1}, \quad (3.8)$$

де:

- $u^l = (x^l, y^l)^T$ - вектор стану системи в момент часу T ;
- x^l, y^l - відповідно x - та y -координати RFID-мітки.

Вимірювання рівня сигналу від RFID-мітки датчиками описується нелінійним рівнянням спостереження, з урахуванням (3.9) можна представити у виді

$$p^l \approx h^l(u^l) + v^l, \quad (3.9)$$

де $h^l(u^l)$ – нелінійна функція, яка описується виразом

$$h^l(u^l) = p_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{(x^l - x_s)^2 + (y^l - y_s)^2}}{r_0} \right) \quad (3.10)$$

Для застосування фільтра Калмана, який є лінійним фільтром, необхідно лінеаризувати нелінійне рівняння спостереження. Це можна зробити за допомогою розкладу в ряд Тейлора в околі попередньої оцінки стану. Алгоритм визначення місцеположення міток описується рівняннями [15]:

$$K^l = \hat{P}^{l-1} \cdot \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \left[\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1} \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_p^2 \right]^{-1};$$

$$\hat{u}^l = \hat{u}^{l-1} + K^{l-1} [p^l - h^l(\hat{u}^{l-1})];$$

$$\hat{P}^l = \hat{P}^{l-1} - K^l \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1},$$

де \hat{u}^l – оцінка вектору стану u^l на l -му кроці

\hat{P}^l – кореляційна матриця помилки оцінки вектору стану u^l

K^l – коефіцієнт підсилення фільтра;

$$\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} = \frac{-10 \cdot a}{\ln(10)} \cdot \left[\frac{\hat{x}^{l-1} - x_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2}; \frac{\hat{y}^{l-1} - y_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2} \right]$$

Для коректної роботи фільтра необхідно задати початкові значення \hat{u}^0 і \hat{P}^0 . Початкові координати RFID-міток \hat{x}^0, \hat{y}^0 визначаються методом найменших квадратів. Цей підхід потребує мінімальної кількості вимірювань потужності сигналів від датчиків, що становить три. Розрахунок описується рівнянням:

$$\omega = 0.5(A^T A)^{-1} A^T b, \quad (3.11)$$

де $\omega^T = (\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0, \hat{r}^0)$ – вектор, що включає оцінки координат RFID-міток;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ x_3 & y_3 & -0.5 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 - 10^{\frac{p_0 - p^1}{5 \cdot a}} \\ x_2 + y_2 - 10^{\frac{p_0 - p^2}{5 \cdot a}} \\ x_3 + y_3 - 10^{\frac{p_0 - p^3}{5 \cdot a}} \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця помилки оцінки вектору ω визначається [15] за допомогою виразу:

$$\Omega = \left(\left(\bar{A}^0 \right)^T H^{-1} \bar{A}^0 \right)^{-1} \quad (3.12)$$

де $\square \square$ – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B;$$

$$B = \text{diag}\{\hat{r}^1, \hat{r}^2, \hat{r}^3\};$$

$$\Sigma = \text{diag}\{\sigma_{r^1}^2, \sigma_{r^2}^2, \sigma_{r^3}^2\};$$

$\sigma_{r^j}^2, j = \overline{1,3}$ – дисперсія вимірювання дальності j -м датчиком.

Для визначення дисперсій вимірювань відстаней можна використовувати емпіричні дані або теоретичні моделі.

$$\sigma_{r^j}^2 = \frac{(r_{\max}^j - r_{\min}^j)^2}{12};$$

$$r_{\max}^j = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^j}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{2 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}};$$

$$r_{\min}^j = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^j}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{-2 \cdot \sigma_j}{10 \cdot a}}.$$

Оскільки спочатку ми маємо оцінку координат мітки в тривимірному просторі (включаючи висоту), а вектор стану фільтра Калмана містить лише дві координати (x, y), то для отримання початкової коваріаційної матриці $\hat{P}(0)$ необхідно викреслити третій рядок та третій стовпець матриці, яка обчислюється за методом найменших квадратів.

Після встановлення початкових значень для положення RFID-мітки та коваріаційної матриці, розроблений алгоритм дозволяє уточнювати місцеположення мітки при послідовному отриманні вимірювань потужності від усіх датчиків сенсорної мережі ($l = \overline{1, S-3}$).

3.4.2. Аналіз ефективності розробленого алгоритму

Для оцінки ефективності запропонованого алгоритму та порівняння його з існуючими методами, описаними в літературі [17, 18], було проведено детальне статистичне моделювання. У рамках моделювання здійснювалися розрахунки координат RFID-міток за допомогою методу найменших квадратів (МНК) для визначення початкових умов роботи фільтра Калмана. Для забезпечення надійності результатів, ініціалізація фільтра здійснювалася на основі вимірювань від трьох датчиків. Оптимальним для проведення експериментів було визначено розташування восьми датчиків рівномірно по периметру приміщення радіусом 7 метрів. RFID-мітки розміщувалися в центрі цього кола. Для оцінки точності алгоритму обчислювалися середньоквадратичні відхилення помилки визначення координат міток. Результати моделювання наведено на рисунку 3.13.

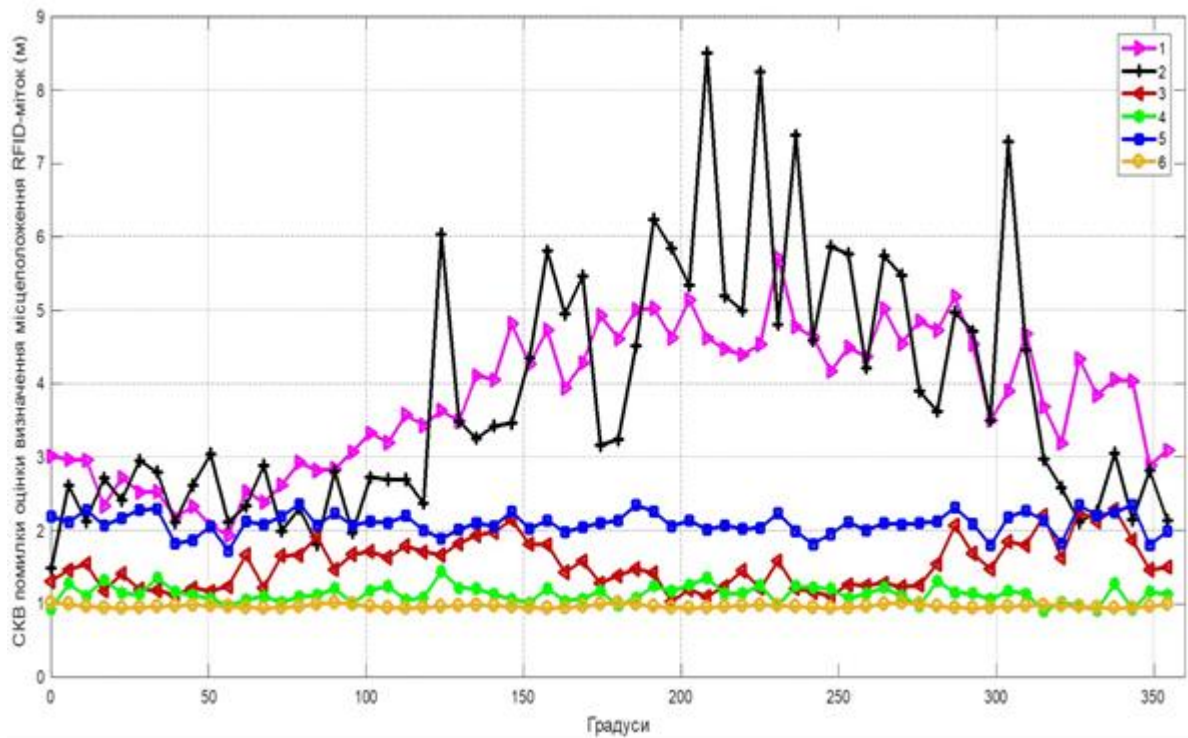


Рис. 3.13. Кругові СКВ помилки оцінки місцеположення RFID-міток

Для оцінки точності розробленого алгоритму та порівняння його з існуючими методами було проведено моделювання методом Монте-Карло. Було розраховано середньоквадратичне відхилення (СКВ) фактичної помилки оцінки координат RFID-міток, яке характеризує точність визначення їх положення.

Початкові значення для фільтра Калмана визначалися на основі вимірювань від трьох датчиків за допомогою методу найменших квадратів (МНК). Кореляційна матриця похибки оцінки параметрів вектору стану P_0 , розрахована за формулою (3.10), використовувалася для побудови теоретичної кривої СКВ МНК (крива 1 на рис. 3.13). Фактичне СКВ, отримане в результаті моделювання, представлено кривою 2.

Результати моделювання показали, що фактичне СКВ знаходиться в межах від 2 до 8.4 метрів. Це свідчить про те, що точність визначення координат міток за допомогою розробленого алгоритму залежить від різних факторів, таких як шум вимірювань, геометрія розташування датчиків та інші.

Для порівняння було розглянуто відомий метод, заснований на МНК, який використовує всі вимірювання від восьми датчиків для обчислення координат мітки (крива 5 на рис. 3.13). Результати показали, що СКВ для цього методу

знаходиться в межах від 1.8 до 2.2 метрів.

Порівняння кривих 4 і 5 на рисунку 3.13 демонструє, що розроблений алгоритм, заснований на фільтрі Калмана, забезпечує більш високу точність визначення координат RFID-міток, особливо при збільшенні кількості ітерацій фільтра. Це пояснюється тим, що фільтр Калмана здатний адаптуватися до змін умов і уточнювати оцінку стану на основі послідовно отриманих вимірювань.

Проведені дослідження показали, що розроблений алгоритм, заснований на фільтрі Калмана, є ефективним інструментом для визначення місцеположення RFID-міток. Він забезпечує більш високу точність порівняно з традиційними методами, заснованими на МНК. Однак, для подальшого підвищення точності необхідно провести додаткові дослідження, спрямовані на оптимізацію параметрів фільтра та врахування особливостей конкретних застосувань.

Розроблений алгоритм має теоретичну межу точності, визначену границею Рао-Крамера (крива 6). Це означає, що досягти точності, нижчої за цю межу, неможливо за даних умов. Результати моделювання демонструють, що наш алгоритм наближається до цієї межі, що свідчить про його високу ефективність. Порівняння з відомим методом [16,17] показує, що в деяких випадках наш алгоритм забезпечує покращення точності на 56-48%, а в інших випадках результати є порівнянними. Однак, через деяку розбіжність у роботі фільтра Калмана, алгоритм може ставати менш чутливим до нових вимірювань, що призводить до незначного погіршення точності в окремих випадках. В середньому, наш алгоритм демонструє покращення точності на 32-36%.

Для більш детального аналізу було проведено моделювання в сферичних координатах. Результати, представлені на рисунках 3.14 та 3.15, показують залежність фактичного СКВ помилки оцінки координат X (крива 1) та Y (крива 2) як для початкових умов, так і для розробленого алгоритму.

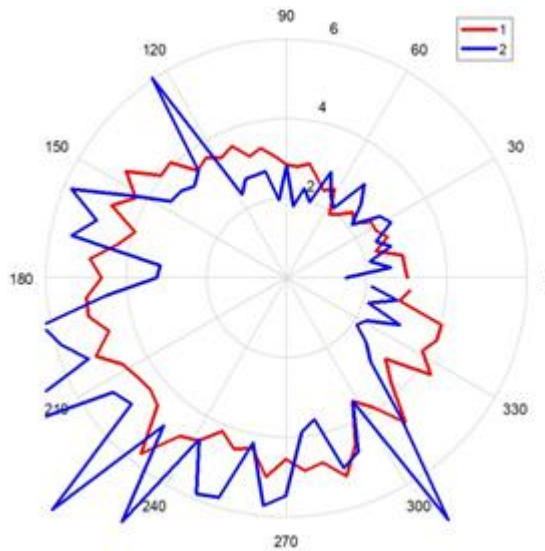


Рис. 3.14. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення RFID-міток для початкових умов.

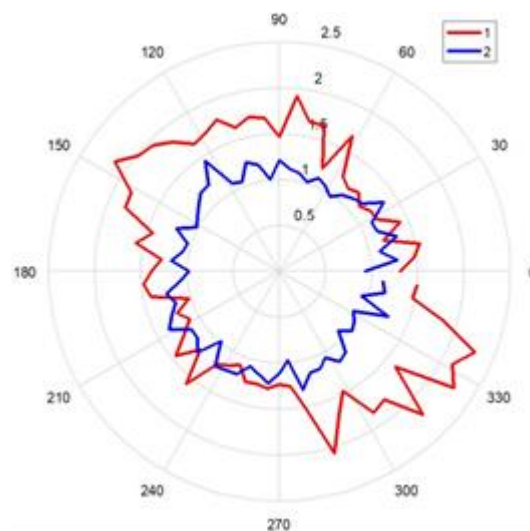


Рис. 3.15. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення RFID-міток розробленого алгоритму.

На рис 3.16 показано ефективність алгоритму після послідовного уточнення оцінки місцеположення RFID-міток.

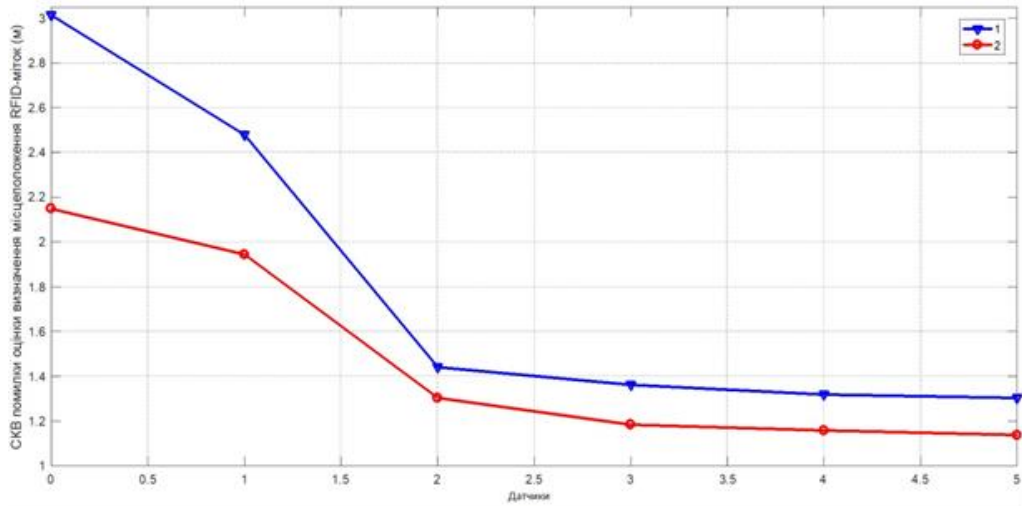


Рис. 3.16. Зміна СКВ помилки оцінки місцеположення RFID-міток при послідовному надходженні даних від датчиків БСМ

Як видно з рисунка, запропонований алгоритм після обробки всіх даних від датчиків дозволив знизити середньоквадратичне відхилення (СКВ) помилки визначення координат RFID-міток у 2,23 рази порівняно з початковими оцінками. Такого суттєвого покращення вдалося досягти завдяки врахуванню матриці коваріації похибок вимірювань відстаней, що дозволило більш точно оцінити невизначеність даних. Порівняння з методом найменших квадратів демонструє перевагу запропонованого підходу, оскільки фільтр Калмана здатний враховувати дисперсію помилки оцінки. При виконанні припущення про гауссовий та адитивний характер помилки, що підтверджується нашими розрахунками, застосування фільтра Калмана дозволяє досягти результатів, близьких до теоретичної межі.

3.4.3. Аналіз можливостей практичної реалізації розробленого алгоритму

Для оцінки ефективності розробленого алгоритму необхідно не лише проаналізувати точність визначення місцеположення RFID-міток, але й оцінити його обчислювальну складність. Адже алгоритм повинен не тільки забезпечувати високу точність, але й працювати ефективно на обчислювальних ресурсах.

У таблиці 3.1 представлений детальний аналіз обчислювальних витрат алгоритму для випадку, коли одна RFID-мітка сканується вісьмома датчиками.

Такий аналіз дозволяє оцінити вимоги алгоритму до обчислювальних ресурсів та визначити потенційні шляхи його оптимізації.

Таблиця 3.1

Аналіз кількості операцій

Величина, яка обчислюється	Число операцій множення	Число операцій ділення	Число операцій додавання
1	2	3	4
K^l	$N^2 L$	$N L$	$N(N-1)L$
u^l	$N L$	0	$(N+1)L$
\hat{P}^l	$(N^2 + N)L$	0	$(2N^2 - 1)L$
$\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l}$	$N^2 L$	0	$[N(N-1)+1]L$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт	$N^2 L + N L + (N^2 + N)L + N^2 L = (3N^2 + 2N)L$	$N L$	$N(N-1)L + (N+1)L + (2N^2 - 1)L + [N(N-1)+1]L = (4N^2 - N + 1)L$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт при $L=8$, $N=3$	264	24	272

Проведений аналіз обчислювальної складності алгоритму, результати якого наведено в таблиці 3.1, дозволяє оцінити його ресурсоемність. Важливо зазначити, що представлені в таблиці дані стосуються лише початкової ініціалізації системи. При подальшій роботі алгоритму, завдяки його рекурсивному характеру, обчислювальні витрати значно знизяться, оскільки більшість проміжних результатів можуть бути повторно використані.

Для ефективної реалізації розробленого алгоритму необхідно обрати відповідну обчислювальну платформу. Зважаючи на вимоги реального часу до

обробки даних в системах RFID, оптимальним рішенням є використання цифрових сигнальних процесорів (DSP). DSP спеціалізуються на обробці сигналів і даних в реальному часі та забезпечують високу продуктивність при виконанні таких операцій як множення і додавання, які є основними для реалізації алгоритму.

Серед сучасних DSP для обробки чисел з плаваючою точкою варто відзначити моделі компаній Analog Devices [18] та Texas Instruments [19]. Для практичної реалізації запропонованого алгоритму може бути використаний сигнальний процесор TMS320C6747. Цей процесор має високу тактову частоту 456 МГц і забезпечує виконання операцій додавання та множення з подвійною точністю за 14 тактів. За оцінками, для виконання однієї ітерації рекурсивного алгоритму визначення місцеположення RFID-мітки на основі RSS-вимірювань необхідно близько 16.478 мкс.

Висновки до розділу

Проаналізувавши існуючі методи визначення місцеположення RFID-міток на основі вимірювань рівня сигналу (RSS), можна зробити такі висновки:

1. Недостатня точність при великій кількості датчиків. Існуючі методи не завжди враховують зростання дисперсії помилок вимірювань при збільшенні кількості датчиків. Це призводить до зниження точності визначення координат RFID-міток.

2. Потреба в адаптивних алгоритмах. Для підвищення точності визначення місцеположення необхідно розробляти алгоритми, які здатні адаптуватися до змін умов середовища та уточнювати координати RFID-міток на основі послідовно отриманих вимірювань.

3. Перспективність застосування фільтрації Калмана. Фільтр Калмана є ефективним інструментом для рекурсивної оцінки стану динамічних систем. Його математичний апарат дозволяє розробляти алгоритми визначення місцеположення RFID-міток, які здатні враховувати невизначеність вимірювань та зміни в умовах середовища.

Для визначення координат RFID-міток у реальному часі було розроблено

алгоритм, що базується на методі калманівської фільтрації. Цей метод дозволяє постійно уточнювати оцінку координат міток з кожним новим вимірюванням сигналу, що приймається бездротовою сенсорною мережею (БСМ). Для оцінки точності розробленого алгоритму було проведене статистичне моделювання. Як критерій точності було обрано середньоквадратичне відхилення (СКВ) помилки визначення координат. Результати моделювання продемонстрували, що запропонований алгоритм забезпечує покращення точності локалізації RFID-міток на 32-36% порівняно з існуючими методами. Для оцінки вимог до обчислювальних ресурсів алгоритму було проведено аналіз його обчислювальної складності. Результати аналізу показали, що для визначення координат однієї RFID-мітки за допомогою восьми датчиків алгоритму необхідно близько 16.478 мікросекунд, що дозволяє ефективно реалізувати його на сучасних мікропроцесорах.

Проведений аналіз демонструє, що розроблений алгоритм може бути ефективно реалізований на сучасних DSP. Використання спеціалізованих процесорів дозволить забезпечити необхідну швидкодію та точність обчислень. При цьому, завдяки рекурсивному характеру алгоритму, обчислювальні витрати можуть бути значно знижені.

ВИСНОВКИ

В роботі ґрунтуючись на аналізі новітніх технологій виробництва мікросенсорних систем проводилась розробка напрямків використання RFID пристроїв у технологіях точного землеробства.

При цьому було проведено огляд RFID технологій та принципи побудови точного землеробства, проаналізовані мікросенсорні мережеві технології для моніторингу врожаю і мінімізації впливу хімічної обробки рослин.

Розглянуто склад системи радіо частотної ідентифікації та фізичні принципи роботи системи та базові технології виготовлення RFID-міток.

В результаті проведеної роботи було розроблено новий рекурсивний алгоритм, що базується на фільтрації Калмана. Відмінною рисою цього алгоритму є врахування дисперсії помилок вимірювань, що дозволило значно підвищити точність визначення координат RFID-міток. Результати експериментальних досліджень показали, що запропонований алгоритм забезпечує покращення точності на 32-36% порівняно з існуючими методами.

Важливим аспектом роботи було визначення оптимальної конфігурації бездротової сенсорної мережі. Дослідження показали, що використання восьми датчиків забезпечує оптимальне співвідношення між точністю визначення координат та вартістю системи. Збільшення кількості датчиків не призводить до суттєвого підвищення точності.

Для оцінки ефективності розробленого алгоритму було проведено аналіз його обчислювальної складності. Результати аналізу показали, що алгоритм може бути реалізований в реальному часі на сучасних мікропроцесорах.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

- Розробка нового рекурсивного алгоритму, що враховує дисперсію помилок вимірювань.
- Підвищення точності визначення координат RFID-міток.
- Оптимізація конфігурації бездротової сенсорної мережі.

Практичне значення одержаних результатів:

1. Розроблений алгоритм на основі RSS-вимірювань дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення RFID-мітки в порівнянні з відомими методами на 32-36%.
2. Конфігурація з восьми датчиків забезпечує найбільш рівномірний вид ізоліній кругового СКВ помилки визначення місцеположення в горизонтальній площині.
3. Розроблений алгоритм визначення місцеположення на основі RSS-вимірювання не вимагає значних обчислювальних затрат і може бути реалізований на сучасних мікропроцесорах в масштабі реального часу.

Таким чином, результати проведеного дослідження є вагомим внеском у розвиток технологій локалізації RFID-міток та відкривають нові перспективи для їх застосування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Impinj speedway reader [Електронний ресурс] // Impinj, Inc. – 2019. – Режим доступу до ресурсу: <https://support.impinj.com/hc/en-us/articles/202755388-Speedway-Reader-Family-Product-Brief-Datasheet>
2. An Introduction to Wi-Fi [Електронний ресурс] // Digi International Inc. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170_b.pdf.
3. Zhu, X., & Feng, Y. (2013). RSSI-based Algorithm for Indoor Localization. Communications and Network, 5(2), 37–42.
<https://doi.org/10.4236/cn.2013.52b007>
4. Timothy J. Black, Pubudu N. Pathirana, Saeid Nahavandi “Position Estimation and Tracking of an Autonomous Mobile Sensor using Received Signal Strength”, IEEE Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2008, pp. 19-24.
5. Liping Zhang, Cheng-Chew Lim, Yiping Chen, and Hamid Reza Karimi “Tracking Mobile Robot in Indoor Wireless Sensor Networks”, Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID 837050, 8 pages.
- A.Masieroa, F. Fissorea, A. Guarnieria, F. Pirottia, A. Vettorea “UAV positioning and collision avoidance based on RSS measurements”, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015, pp. 219-225.
6. Paula Tarrno, Ana M. Bernardos, Jos R. Casar “An RSS Localization Method Based on Parametric Channel Models”, IEEE, International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2007, pp. 265-270.
7. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. -М.: Радио и связь, 1981. -416с.
8. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. -М.: Радио и связь, 1981. - 416с.

9. Э. Сейдж, Дж. Меле. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. -М.: Связь, 1976. -496с.
- 10.Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. -М.: Радио и связь, 1991. -608с.
- 11.Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. -М.: Радио и связь, 1983. - 320с.
- 12.Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой / Монография. К.: НТУУ «КПИ», 2008. -232с.
- 13.Симаков В.А. Построение адаптивных систем пассивной радиолокации на принципах разностно-дальномерной координатометрии / В.А. Симаков // Научные ведомости Белгородский государственный университет . — 2005. — №2. — С. 221.
- 14.Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55. (WEB OF SCIENCE).
- 15.Chan M., Zhang X. “Reader leveled RFID localization approaches and their simulation”, IEEE Long Island System, Applications and Technology Conference, 2017, pp. 1-6.
- 16.He Xu, Ye Ding, Peng Li, Wang R., Yizhu Li. (2017)“An RFID indoor positioning algorithm based on Bayesian Probability and k-nearest neighbor”, Sensors(Basel), 1806,
- 17.Analog Devices | Semiconductors and Signal Processing ICs [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.analog.com/ru/index.html>.
- 18.Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments [Электронный ресурс] // TI.com – Режим доступа до ресурсу: <http://www.ti.com/>.